



HAL
open science

**Rendre l'innovation technologique accessible aux
systèmes irrigués co-conception, évaluation et
implications de la low-tech numérique pour accompagner
la gestion de l'eau en agriculture**

Paul Vandôme

► **To cite this version:**

Paul Vandôme. Rendre l'innovation technologique accessible aux systèmes irrigués co-conception, évaluation et implications de la low-tech numérique pour accompagner la gestion de l'eau en agriculture. Sciences agricoles. Montpellier SupAgro, 2023. Français. NNT: 2023NSAM0025. tel-04747653

HAL Id: tel-04747653

<https://theses.hal.science/tel-04747653v1>

Submitted on 22 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'INSTITUT AGRO MONTPELLIER ET DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER

En Sciences de l'Eau

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau

Portée par l'UMR GEAU – Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages

Rendre l'innovation technologique accessible aux
systèmes irrigués : co-conception, évaluation et
implications de la low-tech numérique pour accompagner
la gestion de l'eau en agriculture

Présentée par Paul VANDÔME

Le 22 Septembre 2023

Sous la direction de Gilles BELAUD

Devant le jury composé de

Christian GERMAIN, Professeur, Bordeaux Sciences Agro

Dominique COURAULT, Directrice de recherches, INRAE

Jacques Eric BERGEZ, Directeur de recherches, INRAE

Sylvain PERRET, Directeur de recherches, CIRAD

Crystèle LEAUTHAUD, Chargée de recherches, CIRAD

Gilles BELAUD, Professeur, Institut Agro Montpellier

Insaf MEKKI, Maître de conférences, INRGREF

Président

Rapporteure

Rapporteur

Examineur

Encadrante

Directeur de thèse

Invitée



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



Préambule

Ces travaux de thèse ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche international *HubIS* (programme européen PRIMA 2019, ANR-19-P026-0006), dont l'objectif est de combler l'écart entre les performances potentielles et réelles de l'irrigation en Méditerranée. Cette thèse a cherché à répondre à plusieurs grands enjeux identifiés dans l'appel du projet *HubIS* : améliorer l'efficacité de l'usage de l'eau en agriculture, réduire les inégalités socio-économiques d'accès à l'innovation pour l'irrigation, et limiter son impact sur les ressources en eau de surface et souterraines pour soutenir la durabilité des systèmes hydrologiques méditerranéens.

La thèse a bénéficié des financements du Cirad et de la région Occitanie. Elle s'est déroulée au sein de l'unité mixte de recherche GEAU, dans les locaux du génie rural de l'Institut Agro Montpellier, et en partenariat avec l'Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF) tunisien, dans ses locaux à Tunis. Cette thèse a été encadrée par le Pr. Gilles Belaud (UMR GEAU, Institut Agro Montpellier), la Dr. Crystèle Léauthaud (UMR GEAU, CIRAD) et la Dr. Insaf Mekki (INRGREF). Nous remercions le CTV Haouaria, le GDA Echraf, et le Domaine du Merle pour leur participation dans le projet.

Résumé

La durabilité de l'agriculture irriguée est menacée par une tension croissante sur la ressource en eau, dont la surexploitation conduit à une dégradation des écosystèmes, en particulier dans le bassin méditerranéen. En dépit d'investissements dans des équipements modernes coûteux, les performances des systèmes irrigués demeurent en dessous des attentes, notamment en raison d'effets induits à plus large échelle. Les technologies numériques de l'information offrent de nouvelles opportunités pour mieux comprendre et mieux gérer la ressource en eau, mais elles restent peu accessibles et peu adaptées aux contextes agraires, en particulier pour les systèmes irrigués gravitaires et dans le Sud global. Dès lors, dans quelle mesure le développement participatif de technologies numériques pour l'information peut-il aboutir à de nouveaux outils utiles et accessibles pour améliorer les performances des systèmes irrigués et contribuer à une meilleure durabilité des territoires? Les résultats de nos travaux de thèse montrent que l'innovation numérique pour la gestion de l'irrigation n'a pas nécessairement besoin d'être complexe, onéreuse et intensive en énergie. Nous avons développé de nouveaux systèmes de mesure en temps réel et d'automatisation simples, *open source*, auto-constructibles et à bas coût pour accompagner la gestion de l'eau avec des agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire en France et l'irrigation localisée en Tunisie. Nous avons proposé une méthode de modélisation multi-critère et multi-échelle pour simuler les effets de l'adoption de ces nouveaux outils sur les performances des systèmes irrigués. Nos résultats mettent en perspective les bénéfices des changements de pratiques liés à l'adoption des innovations, et illustrent les compromis émergeant à plus large échelle. Nous estimons que ces travaux contribueront à la démocratisation des *low-tech* numériques pour des systèmes irrigués plus autonomes et plus économes. Les outils et méthodes proposés sont hautement reproductibles et ouvrent la voie à de futures recherches pour la compréhension et la gestion des flux d'eau dans des contextes agro-hydrologiques variés.

Mots clés : Gestion de l'eau agricole ; Irrigation de précision ; Agriculture numérique ; Innovation participative ; Modélisation agro-hydrologique ; Capteurs hydrologiques *low-tech* ; Internet des objets.

Abstract

The sustainability of irrigated agriculture is threatened by growing pressure on water resources, whose over-exploitation is leading to the degradation of ecosystems, especially in the Mediterranean basin. Despite investment in costly modern equipment, the performance of irrigation systems remains below expectations, notably due to induced effects on a wider scale. Digital information technologies offer new opportunities for better understanding and management of water resources, but they remain relatively inaccessible and poorly adapted to agrarian contexts, particularly for surface irrigation systems and in the global South. Therefore, to what extent can the participatory design of digital information technologies result in new tools that are useful and accessible to improve the performance of irrigation systems and contribute to greater territorial sustainability? The results of our PhD thesis show that digital innovation for irrigation management does not necessarily have to be complex, expensive and energy-intensive. We developed new simple, open source, do-it-yourself and low-cost measurement and automation systems to support real-time water management with farmers practising surface irrigation in France and drip irrigation in Tunisia. We proposed a multi-criteria and multi-scale modeling method to simulate the effects of the adoption of such new tools on the performance of irrigation systems. Our results put into perspective the benefits of changes in practices resulting from the adoption of innovations, and illustrate the trade-offs emerging on a larger scale. We believe that this work will contribute to the democratisation of digital low-tech for more autonomous, energy and water-saving irrigation systems. The designed tools and methods are highly reproducible and open the way to future research on the understanding and management of water flows in various agro-hydrological contexts.

Key words : Agricultural water management ; Precision irrigation ; Digital farming ; Participatory design ; Agro-hydrological modeling ; Low-tech water sensors ; Internet of Things (IoT).

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier les membres du jury, Dominique Courault, Jacques-Eric Bergez, Sylvain Perret et Christian Germain, pour le temps accordé à ces travaux de thèse. Je vous en souhaite bonne lecture.

Un grand merci à mes encadrants, Gilles, Crystèle et Insaf, équipe agro-hydrologique complémentaire et à la curiosité contagieuse. Gilles, je n'oublierai pas ton implication jusqu'au dernier coup de pioche dans le cailloutis de la Crau et la collecte du dernier capteur dans les sables du Cap Bon. Crystèle, merci pour ton énergie, ton engagement et ton art de poser les bonnes questions, ça a été un vrai plaisir de travailler avec toi. Merci à toi Insaf, pour ta bienveillance et le partage de ta connaissance de l'agriculture tunisienne.

Je veux remercier toute l'équipe de l'INRGREF, et en particulier Abdelaziz, Intissar, Nesrine et Tarek pour leur accueil et leur aide précieuse sur le terrain. Abdelaziz, j'ai beaucoup appris à tes côtés.

Je souhaite remercier l'ensemble des participants à la conception de ces innovations : agriculteurs de la Crau, agriculteurs d'El Haouaria, étudiants de l'Institut Agro Montpellier et de l'Institut Agronomique de Chott Mariem, enseignants chercheurs de l'ISACM, responsables d'associations ou de collectifs d'agriculteurs, merci à tous ! Ces travaux sont aussi les vôtres.

Un grand merci au Domaine du Merle qui a accueilli nos essais et nos ateliers en Crau. Merci à Pierre-Marie, Didier, Vasile et tout particulièrement à François, ta passion débordante et ton sens du partage sont une vraie aubaine pour la recherche et pour le territoire.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du projet *HubIS* pour nos échanges enrichissants à tous les coins de la méditerranée. Merci particulièrement à Rosario, Helena, Nicolas, Abla et Paula.

Merci à Mehdi et Nabil pour votre accueil et votre gentillesse. Je garde de sacrés souvenirs de notre installation de l'antenne relais ou du montage de la khaïma à l'olivier millénaire. Bonne chance dans vos projets, que la récolte d'olives soit bonne et que la mobylette low-tech tienne la route.

Merci aux stagiaires qui ont contribué à ce travail de thèse, Pauline, Gauthier et Oliver alias zitouni, je vous souhaite à tous les trois de vous épanouir dans vos jeunes carrières d'ingénieurs.

Après ces années passées au sein de l'équipe Geau du génie rural, je ne peux qu'être reconnaissant auprès de cette super équipe : Laure, Cédric, Julien, Fred, Kevin, Frank et aux anciens Hélène, Amine, Jeanne, Fabien, merci à tous, pour la vie au labo et pour les coup de main spécifiques (les intéressés se reconnaîtront). Merci également à tout le reste du labo pour la bonne ambiance générale !

A l'UMR Geau dans son ensemble, merci pour ce collectif intelligent et inspirant. Je remercie en particulier Delphine, Marcel, Caroline, Cyril et Jean-Philippe, qui ont contribué de près ou de loin à ces travaux de thèse.

Merci à la belle équipe AgroTIC pour leurs diverses contributions à ce travail, notamment à Bruno et Guilhem pour la publication ECPA, Léo, Yoann et Jean-Philippe pour les discussions préalables à la présentation du WatAr, Basile pour les coups de main au Fab Lab, et Thomas pour son invitation aux journées scientifiques et pour son engagement salutaire.

Merci à l'équipe de tennis de l'Agro Montpellier, pour les sessions d'entraînement libératrices, et pour la coupe de champions d'Hérault !

Simon, je sais que tu ne liras pas ces remerciements et encore moins cette thèse, donc je me permets quelques compliments. D'abord, on s'est bien marrés. Et puis sans toi, cette thèse n'existerait pas : merci de m'avoir fait découvrir ton monde de geek, merci d'avoir répondu au téléphone à chaque urgence de maintenance, merci d'avoir bravé les dangers de la harissa pour m'aider à siliconer des tubes de PVC de l'autre côté de la méditerranée, bref, merci pour ton cerveau open-source. Longue vie au mobilab !

Christina, je te dois beaucoup, et je ne parle pas seulement de la visite guidée de Vienne ou de la dernière bouteille de rosé de Phnom Penh. J'espère que nous continuerons à alterner sessions boulot et apéros.

A la bande de joyeux lurons du bureau des doctorants (celui de gauche précisons), Chloé, Lazare, Arturo, Clémence et Nicolas, merci pour cette bonne ambiance, je vous souhaite bon courage pour la fin de vos thèses respectives et je suis sûr qu'on aura l'occasion de fêter ça tous ensemble.

A la bande de joyeux lurons plus élargie, à tous les copains qui ont accompagné le chemin de ces presque dix ans d'études, Sylex et Man, Tom, Margot, Arthur, les colocs que je laissais gagner au baby foot, Sancier, Roro, Victoire, Jesus, Amandine, Jojo, Tété, Julot, Faizan, Ben, Etron, et aux autres, cette thèse est aussi le fruit insoupçonné de certaines (pas toutes) de nos discussions.

A ma famille, à mon frangin qui viendra bientôt grossir la liste des publications P. Vandôme, et à mes grands parents qui ont toujours cru en moi, "on y croit, on se bat".

A mes parents, qui m'ont façonné avec amour (premier prototype), et m'ont donné le goût des longues études et de l'agronomie.

A Anna, qui aurait pu écrire cette thèse tant elle sait lire en moi.

A la mémoire de *Luciano Mateos Íñiguez*, qui a inspiré ces recherches.

Table des matières

Introduction	1
1 Chapitre 1 : Cadre conceptuel	6
1.1 L'agriculture irriguée en quête de performances	7
1.1.1 Systèmes irrigués, représentations et enjeux	7
1.1.2 Quels leviers pour des systèmes irrigués durables?	9
1.1.3 A propos de la notion de performance	15
1.2 Innover pour et avec les agriculteurs	21
1.2.1 La co-conception : une démarche d'innovation participative	21
1.2.2 Bricolage et low-tech numérique	22
1.3 Méthodologie générale	25
1.3.1 Problématique	25
1.3.2 Stratégie de recherche	26
1.3.3 Plan de la thèse	29
2 Chapitre 2 : Façonner l'innovation pour l'adapter aux terri- toires irrigués	31
2.1 Introduction du Chapitre 2	33
2.2 Appréhender les contextes agraires et les contraintes locales de gestion de l'eau	35
2.2.1 Etude intégrée de deux territoires irrigués méditerranéens .	35
2.2.2 La plaine agricole d'El Haouaria : contexte géographique, climatique et socio-économique	36
2.2.3 La plaine de la Crau : contexte géographique, climatique et socio-économique	42

2.2.4	La plaine d’El Haouaria, une durabilité menacée par la sur-exploitation des ressources en eau souterraines	46
2.2.5	La plaine de la Crau, en recherche d’équilibre entre transfert d’eau en surface et recharge souterraine	53
2.2.6	Systèmes de culture irrigués	59
2.2.7	Systèmes de production	66
2.3	Water User Fab Labs : une approche participative pour concevoir l’innovation	70
2.3.1	Cristalliser la recherche d’alternatives	70
2.3.2	Les WFL en pratique : penser et expérimenter l’innovation collectivement	72
2.4	Article I - Exploring ways to improve agricultural water management in two Mediterranean irrigated systems	75
2.4.1	Résumé	75
2.4.2	Introduction	78
2.4.3	Methods and study sites	78
2.4.4	Results	80
2.4.5	Conclusions	82

3 Chapitre 3 : Conception et expérimentation de réseaux de capteurs low-tech pour accompagner la gestion de l’eau agricole 84

3.1	Introduction du Chapitre 3	86
3.2	Article II - A low cost sensor to improve surface irrigation management	88
3.2.1	Résumé	88
3.2.2	Introduction	89
3.2.3	Materials and methods	90
3.2.4	Results	92
3.2.5	Discussion	94
3.2.6	Conclusion	95

3.3	Article III - Design of a low-cost wireless sensor network for drip irrigation monitoring in Tunisia	97
3.3.1	Résumé	97
3.3.2	Introduction	101
3.3.3	Materials and methods	102
3.3.4	Results	110
3.3.5	Discussion	119
3.3.6	Conclusion	121
3.4	Un système d'automatisation à bas coût pour la gestion de l'irrigation gravitaire	127
3.4.1	Contexte et objectifs	127
3.4.2	Résultats	128
3.4.3	Expérimentations au champ et perspectives	132
4	Chapitre 4 : Adoption des nouvelles technologies : perspectives et impacts sur les performances des systèmes irrigués	135
4.1	Introduction du Chapitre 4	137
4.2	Adoption et diffusion des low-techs : réflexions tirées de l'étude de deux territoires irrigués méditerranéens	139
4.2.1	Water User Fab Labs, vitrines de l'innovation ?	139
4.2.2	Potentiel d'adoption de la low-tech numérique pour l'agriculture, éclairages de la plaine irriguée d'El Haouaria	141
4.2.3	Freins, moteurs et glissement des limites à l'adoption des nouvelles technologies	145
4.2.4	Ateliers de conception, arme de diffusion massive	147
4.3	Article IV - Revisiting border irrigation management : benefits of new in-field sensor-based control compared to conventionnal cutoff times	152
4.3.1	Résumé	152
4.3.2	Introduction	155
4.3.3	Materials and methods	158

4.3.4	Results	167
4.3.5	Discussion	171
4.3.6	Conclusion	174
4.4	Automatisation de l'irrigation gravitaire d'un petit périmètre irrigué : à qui profite le "clic" ?	179
4.4.1	Contexte et objectifs	179
4.4.2	Matériel et méthode	180
4.4.3	Résultats	187
4.4.4	Discussion	190
5	Discussion et conclusion générales	196
5.1	Discussion générale	197
5.2	Perspectives	206
5.3	Conclusion générale	211
	Annexes	241
A	Guide d'entretien pour l'étude technico-économique de l'agriculture dans la plaine d'El Haouaria	242
B	Exemple de calendrier d'irrigation au tour d'eau	252
C	Répartition des cultures sur le PPI d'Echraf, printemps été 2020	253
D	Itinéraires techniques des principaux systèmes de culture sur le PPI d'Echraf	255
E	Guide d'entretien : potentiel d'adoption du capteur Pilowtech.	257
F	Tutoriel de fabrication du WatAr	263
G	Tutoriel de fabrication du Pilowtech	278
H	Atelier de construction d'un capteur d'humidité low-tech, forum pour l'agroécologie ANzAR 2023.	292

Table des figures

1.1	Schéma de méthodologie générale de la thèse. S1, S2 et S3 = 1ère, 2nde et 3ème étapes de la stratégie de recherche.	28
2.1	Une zone d'étude composée de deux territoires irrigués méditerranéens : la plaine de la Crau (France) et la plaine d'El Haouaria (Tunisie).	36
2.2	Plaine irriguée d'El Haouaria, Tunisie.	37
2.3	Diagramme ombrothermique de la plaine d'El Haouaria, station d'El Haouaria, période 1966-2004. Crédit : Ben Hamouda, 2008.	38
2.4	Travail agricole dans la plaine d'El Haouaria : travail du sol par traction animale (en haut) et emploi de main d'oeuvre pour la plantation du piment (en bas), Avril 2021.	40
2.5	Plaine de la Crau, France.	42
2.6	Données climatiques moyennes de la plaine de la Crau (Station du Merle, 1993-2017)	43
2.7	Périmètre public irrigué d'Echraf, plaine d'El Haouaria. Données : INRGREF, 2021.	49
2.8	Infrastructures hydrauliques du PPI d'Echraf : forage (a), bassin de stockage (b), station de pompage (c, d), et château d'eau (e).	50
2.9	Historique et répartition des volumes distribués par le PPI d'Echraf. Données : GDA Echraf, 2021.	52
2.10	Fonctionnement de la nappe phréatique de la Crau. Source : SYM-CRAU, 2020.	54
2.11	Bilan général des flux sur l'hydro système de la Crau. En $Mm^3.an^{-1}$. Crédit : Etude Sinergi, SYMCRAU, 2020.	56

2.12 Associations d’irrigants dans la plaine de la Crau. Données : Syndicat mixte de gestion des association syndicales du pays d’Arles.	57
2.13 Parcelle de pomme de terre, PPI d’Echraf, 2021.	60
2.14 Arboriculture dans la plaine d’El Haouaria : a) citronnier quatre saisons, b) olivier millénaire d’Echraf, 2021.	62
2.15 Répartition des systèmes de culture dans la plaine de la Crau. Données : CES OSO, 2016.	63
2.16 Irrigation à la planche du foin de Crau : opération d’une martelière (a) et submersion du champ (b).	64
2.17 Arboriculture dans la plaine de la Crau : a) plantation de nouveau verger, b) verger de pêchers en production. Crédit : Pauline Ibgui, 2021.	65
2.18 Fonctionnement des Water user Fab Labs.	71
2.19 Support d’analyse participative à partir des résultats d’enquête, exemple du WFL de la Crau, 2021.	73
2.20 Atelier de démonstration dans le cadre du WFL d’Echraf, 2021.	73
2.21 Les WFL comme espaces de conception, maintenance et formation : a) WFL d’Echraf et b) WFL de la Crau.	74
2.22 Shaping innovation to match territories. SH : stakeholders.	83
2.23 Example of innovations developed : WatAr sensor (a), Flowter sensor (b), Pilowtech sensor (c).	83
3.2.1 Hardware description for the wireless irrigation system (" <i>WatAr</i> ") design : a) components and costs table; b) electronic diagram.	97
3.2.2 Dataflow architecture : from the device on field to the user’s smartphone.	97
3.2.3 Opertionnal prototype (" <i>WatAr</i> ") in use during the 2022 irrigation season : a) the WatAr on the experimental site; b) the sensor (without its protective shell) in low position (absence of water) and c) in high position (presence of water) which leads to d) water detection alert in the Telegram application on user’s smartphone.	97

3.2.4 Progression of surface water over time on an irrigated field (total length 270 m; area 1 ha). The red zones indicate the farmer's visits to the field. The star indicates when the *WatAr* alert was sent, the farmer not having the message. 97

3.3.1 Flowchart of the water sensor network. 127

3.3.2 Electrical circuit of the Pilowtech sensor. The numbers refer to Table 4. 127

3.3.3 Laboratory calibration of the soil moisture sensor. 127

3.3.4 Field calibration of the soil moisture sensor using 3 different soil samples (P1, P2, P3) and sensors (A, B, C). 127

3.3.5 Soil moisture time series as displayed on the online reading platform. 127

3.3.6 Reading of the soil moisture status in the field using the Pilowtech : (a) farmer plugging into the sensor and (b) display showing available water content (%). 127

3.3.7 Monitoring of water status in plot "P2" : comparison between the Pilowtech (red curves) and a commercial tensiometer sensor (grey curves). The Pilowtech data gap from May 20 to May 23 was due to a power failure, independently from our system. 127

3.3.8 Monitoring soil moisture content in plot "P1" : comparison of the Pilowtech (red curves) and a commercial capacitance sensor (grey curves). 127

3.3.9 Monitoring soil moisture content in plot "P1" : comparison of the magnitude of changes in soil moisture recorded by the Pilowtech and a commercial capacitance sensor. 127

3.1 Description, coûts et composants du système d'automatisme Lancelot : module de pilotage (I), dispositif d'accrochage (II), vanne martelière (III). 130

3.2 Architecture de la communication des données pour le système d'automatisation de vanne d'irrigation Lancelot. 131

3.3 Expérimentation de l'automatisation des vannes d'irrigation gravitaire par le système Lancelot : pilotage au smartphone par l'utilisateur. 132

4.1	Étude du potentiel d'adoption du <i>Pilowtech</i> , capteur d'humidité du sol à bas coût. Juin 2022, El Haouaria, Tunisie. Crédit : Oliver Sainlez.	142
4.2	Maintenance d'un capteur <i>Flowter</i> , WFL de la Crau (a), et d'un capteur <i>Pilowtech</i> , WFL d'Echraf (b).	146
4.3	Ateliers de co-construction de capteurs low-tech pour la gestion de l'eau agricole, en présence : d' agriculteurs (a), de représentants d'organisations agricoles (b), multi-acteurs (c), d'enseignants chercheurs (d).	148
4.3.1	Overall methodology of the study.	179
4.3.2	SurfIrrri model overview.	179
4.3.3	Comparison of flow depths measured and simulated with WinSRFR software after adujstment of the infiltration parameters.	179
4.3.4	Method for the search of the optimum irrigation cutoff times and distances, and the evaluation of the changes in performance depending on the water management scenario.	179
4.3.5	Simulated effects of sensor-based management on the performance of border irrigation compared with current practices.	179
4.3.6	Sensitivity of application efficiency (a) and requirement efficiency (b) to inflow rate variability depending on management scenarios.	179
4.4	Système d'étude : un secteur tertiaire d'irrigation gravitaire du foin.	182
4.5	Comparaison de la répartition moyenne des volumes d'irrigation au cours de la saison : a) selon le scénario de référence et b) selon le scénario d'automatisation par capteur au champ.	188
5.1	<i>Low-tech</i> numériques pour l'agriculture : ouvrir la "boite noire" des technologies de précision pour en faire une "boite blanche".	201

Liste des tableaux

2.1 Synthèse comparative des principaux systèmes de production des territoires irrigués de la Crau et d'El Haouaria.	69
3.3.1 Set of specifications for the development of the water sensor defined during the co-innovation process.	127
3.3.2 Soil samples properties.	127
3.3.3 Parameters for the 3 different soils (P1, P2, P3) and 3 sensors (A, B, C).	127
3.3.4 Low-tech soil moisture sensor cost table.	127
3.1 Cahier des charges établi par le Fab Lab d'usagers de l'eau de la Crau pour le développement d'une vanne d'irrigation automatique	128
4.3.1 Notations for the variables and parameters used in the SurfIrri model.	179
4.3.2 Summary of the experimental field parameters.	179
4.3.3 Evaluation of optimal cutoff time and sensor position lengthwise the field over the irrigation season.	179
4.1 Résumé des paramètres parcellaires utilisés pour la simulation . .	183
4.2 Impacts du scénario de gestion sur la satisfaction des besoins en eau et le temps de travail.	188
4.3 Mosaïque des productivités de l'eau en fonction des scénarios de pilotage de l'irrigation, des critères et des perspectives.	189

Liste des abréviations

ACM	.....	Analyse des Correspondances Multiples
ADC	.....	Analog to Digital Converter
AOP	.....	Appellation d'Origine Protégée
AE	.....	Application Efficiency
ASA	.....	Association Syndicale Autorisée
ASL	.....	Association Syndicale Libre
CIE	.....	Classical Irrigation Efficiency
CRDA	.....	Commissariat Régional de Développement Agricole
CTV	.....	Centre Technique de Vulgarisation
CV	.....	Coefficient de Variation
DE	.....	Distribution efficiency
DIY	.....	Do It Yourself
DT	.....	Dinar Tunisien
EDF	.....	Electricité de France
EIE	.....	Effective Irrigation Efficiency
ETa	.....	Evapotranspiration réelle
ETc	.....	Evapotranspiration de la culture
ETo	.....	Evapotranspiration potentielle
FAO	.....	Food and Agriculture Organization
FDR	.....	Frequency Domain Reflectometry
GDA	.....	Groupement de Développement Agricole
GPS	.....	Global Positioning System
ICT	.....	Information and Communication Technology
IE	.....	Irrigation Efficiency
INRAE	.....	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
IoT	.....	Internet of Things

LAI	Leaf Area Index
LCD	Liquid Crystal Display
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
Mm^3	Millions de mètres cubes
n	Coefficient de rugosité de Manning
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OUGC	Organisme Unique de Gestion Collective
PAC	Politique Agricole Commune
PPI	Périmètre Public Irrigué
PVC	PolyVinyl Chloride
PWP	Permanent Wilting Point
Q_i	Débit injecté
RE	Requirement Efficiency
RIS	Relative Irrigation Supply
RWS	Relative Water Supply
SAU	Surface Agricole Utilisée
SP	Système de Production
SYMCRAU	Syndicat Mixte de Gestion des nappes de la Crau
TAW	Total Available Water
T_{co}	Cutoff time
TDR	Time Domain Reflectometry
Vapp	Volume d'irrigation appliqué
Vp	Volume percolé en profondeur
Vreq	Volume requis
Vro	Volume ruisselé en colature
Vrz	Volume stocké dans la zone racinaire
WFL	Water user Fab Lab
WP	Water Productivity

LISTE DES TABLEAUX

WPa	Productivité de l'eau agricole
WPe	Productivité de l'eau économique
WS	Water Sensor
WSN	Wireless Sensor Network
WUA	Water Users Association
WUE	Water Use Efficiency
θ	Humidité du sol
3D	3 Dimensions

Introduction générale

L'irrigation est un aspect fondamental de la production agricole. L'année 2022, marquée par une sécheresse exceptionnelle en Europe et dans le bassin méditerranéen en raison d'un déficit de précipitations et d'importantes anomalies positives de température (Joint Research Centre, 2022), a rappelé son importance et sa fragilité. Les recherches du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat prévoient une intensification des événements hydrologiques extrêmes, notamment des épisodes de déficit hydrique plus longs et plus fréquents dans la région méditerranéenne considérée comme un *hotspot* du changement climatique (Ali et al., 2022). Les activités agricoles, largement dépendantes de la disponibilité en eau, sont particulièrement impactées et menacées. L'irrigation représente une réponse à la vulnérabilité de l'agriculture à la sécheresse. En conséquence, les surfaces irriguées ont augmenté ces dernières décennies, et cette augmentation se poursuivra très probablement dans les années à venir (FAO, 2022).

Pour autant, la pression sur la ressource en eau est déjà critique dans de nombreuses régions du monde, en raison non seulement de la forte variabilité spatio-temporelle de sa distribution, mais aussi d'une demande croissante pour les usages industriels, domestiques et agricoles, en particulier dans le bassin méditerranéen (F. Molle, Sanchis-Ibor et al., 2019). Cette pression anthropique mène déjà dans de nombreux contextes à des situations de pénurie, qui se traduisent par des politiques de restriction des prélèvements et des conflits d'usages de l'eau (Döring, 2020 ; F. Molle, 2006 ; Blomquist et Schlager, 2005). En outre, l'intensification de l'agriculture par le développement de l'irrigation en l'absence de gestion intégrée à l'échelle territoriale s'accompagne souvent d'une dégradation

des écosystèmes et peut conduire à terme à la fermeture des bassins hydrologiques (F. Molle, Wester et al., 2010 ; Venot, Turrall et al., 2007).

En dépit d'investissements conséquents dans des équipements d'irrigation modernes et coûteux en énergie (Daccache, 2014), les performances de l'irrigation à l'échelle de la parcelle demeurent en dessous des attentes (Howell, 2003). En conditions réelles, ces performances peuvent s'avérer bien moindres (Benouniche, Kuper et al., 2014), et les effets de la modernisation des équipements restent peu connus et difficilement extrapolables, les gains d'efficience pouvant varier de 0% à 75% (Serra-Wittling et al., 2019a). A plus large échelle, les performances des systèmes irrigués restent insuffisantes malgré les efforts déployés. Les économies d'eau réelles sont rares, notamment en raison des effets rebond (Berbel, Gutiérrez-Martín et al., 2015 ; Wheeler et al., 2020 ; Venot, Kuper et al., 2017) et des effets d'échelle (Mateos et Araus, 2016 ; Grafton et al., 2018).

L'irrigation de précision a prospéré dans les dernières décennies afin de proposer des outils pour mieux comprendre et mieux gérer la ressource en eau. Ainsi la recherche s'est attachée à produire une diversité de modèles numériques pour simuler des stratégies de gestion de l'eau et éclairer la prise de décision des usagers (L. Pereira et al., 2020 ; Cheviron et al., 2020 ; Merot et Bergez, 2010). A l'échelle de l'exploitation agricole, le pilotage de l'irrigation au moyen de sondes d'humidité du sol s'est montré prometteur pour favoriser une meilleure adéquation entre les besoins en eau de la culture et le calendrier d'irrigation, et réduire les volumes d'irrigation au terme de la saison (Serra-Wittling et al., 2019a ; Datta et Taghvaeian, 2023). Le développement des technologies numériques de l'information et de la communication (Bellon-Maurel et Huyghe, 2016) a par ailleurs offert de nouvelles opportunités pour le pilotage de l'irrigation aux différentes échelles des systèmes irrigués. La multiplication de l'offre en capteurs, satellitaires ou au champ, et l'accessibilité de leurs données en ligne, rend notamment possible le suivi en temps réel des variables biophysiques, et leur intégration dans des outils d'aide à la décision ou des dispositifs d'automatisation (Hendrickx et al., 2016 ; Malaterre et al., 2013 ; Goumopoulos et al., 2014 ; Karthikeyan et al., 2020). Les récentes avancées dans le domaine de l'internet des objets (*IoT*) ouvrent de nou-

velles perspectives pour la mesure des flux d'eau aux échelles de la parcelle ou du périmètre irrigué, à travers le déploiement de réseaux de capteurs connectés (Tao et al., 2021 ; Hamami et Nassereddine, 2020). Pour autant, une grande partie de ces technologies demeure réservée au domaine de l'ingénierie et de la recherche, et sont en pratique peu utilisées par les agriculteurs (Koech et al., 2021), en particulier dans les systèmes irrigués de surface et dans le Sud global (Berthold et al., 2021).

A la lumière de ces considérations, nous chercherons dans ce travail à développer des innovations numériques utiles et accessibles aux systèmes irrigués pour accompagner la gestion de l'eau en agriculture et contribuer à une meilleure durabilité des territoires. Aussi, comment orienter la recherche de performance des systèmes irrigués pour éviter les déséquilibres à l'échelle territoriale ? Et dans quelle mesure, et sous quelles formes, les technologies numériques peuvent-elles être façonnées par les territoires pour contribuer à cette recherche de performance ? Enfin, comment évaluer les effets de l'adoption de ces nouvelles technologies sur les performances des systèmes irrigués, en tenant compte de leurs implications à plus large échelle ? Nous proposons dans cette thèse d'explorer des voies de l'innovation alternatives au sein des territoires irrigués.

De nouveaux paradigmes de recherche sont nécessaires pour répondre à ces défis. Nous faisons l'hypothèse que l'accès à l'information à un niveau sans précédent, *via* des capteurs au champ et de l'information facilement accessible, peut constituer un levier majeur pour accompagner la gestion de l'eau en agriculture et améliorer les performances des systèmes irrigués. En revanche, cette performance ne peut être limitée à la notion exclusive d'efficience de l'irrigation à l'échelle de la parcelle, au risque d'entraîner la promotion systématique de techniques coûteuses avec de nombreux effets induits. En outre, une évolution du conventionnel transfert de technologie *top down* vers un processus d'innovation davantage *bottom up* est nécessaire afin de rendre l'irrigation de précision plus accessible et plus adaptée à la réalité des systèmes irrigués.

Notre travail nous a conduit à façonner de nouveaux outils pour le pilotage de l'irrigation avec des usagers de l'eau dans le sud de la France et au nord

de la Tunisie. De ces contextes agraires, représentatifs de différents enjeux de l'agriculture irriguée méditerranéenne, sont nés une diversité de capteurs à bas coût, *low-tech* et *open source*, qui ont été expérimentés avec les agriculteurs. A partir d'ateliers participatifs et d'un travail d'enquête complémentaire réalisé sur le site tunisien, nous avons étudié les perspectives d'adoption et de diffusion de ces *low-tech* numériques pour la gestion de l'eau, au sein et au delà des territoires étudiés. Finalement, nous proposons une méthode d'évaluation des effets de l'adoption des nouvelles technologies sur les performances des systèmes irrigués par une approche multi-échelle et multi-critère, à travers l'exemple des innovations développées sur le site français.

Chapitre 1

Cadre conceptuel

Table des matières

1.1	L'agriculture irriguée en quête de performances	7
1.1.1	Systèmes irrigués, représentations et enjeux	7
1.1.2	Quels leviers pour des systèmes irrigués durables?	9
1.1.3	A propos de la notion de performance	15
1.2	Innover pour et avec les agriculteurs	21
1.2.1	La co-conception : une démarche d'innovation participative	21
1.2.2	Bricolage et low-tech numérique	22
1.3	Méthodologie générale	25
1.3.1	Problématique	25
1.3.2	Stratégie de recherche	26
1.3.3	Plan de la thèse	29

1.1 L'agriculture irriguée en quête de performances

1.1.1 Systèmes irrigués, représentations et enjeux

Si le terme de "périmètre irrigué", qui correspond à la délimitation dans l'espace d'une zone agricole bénéficiant d'un apport d'eau de la main de l'homme, est relativement peu équivoque, le terme de "système irrigué" est davantage sujet à interprétations. Selon E. Ostrom (1992), le système irrigué "comprend la structure physique, les usagers, les organisations chargées de sa gestion et les règles dont les usagers et d'autres intervenants se servent pour gérer le système" (traduit par P. Lavigne Delville, 1997). Nous comprenons que la structure physique correspond aux infrastructures hydro-agricoles permettant la distribution de l'eau d'irrigation au sein du périmètre. Ces infrastructures se retrouvent sous une grande diversité de formes et de dimensions, du réseau collectif de canaux gravitaires à surface libre à la station de pompage individuelle. Les usagers de l'eau sont les agriculteurs pratiquant l'irrigation, mais également les aiguadiers, gestionnaires de canaux, résidents bénéficiant des eaux du réseau collectifs, etc. Les organisations en charge de la gestion des systèmes irrigués varient selon les échelles et selon les régions (ex. associations d'usagers de l'eau à l'échelle du réseau tertiaire et secondaire, établissement public à l'échelle du réseau primaire). De même, les règles de gestion couvrent un large spectre, comprenant entre autres les règles internes de répartition de la ressource propres aux exploitations agricole, les règles de gestion collective (ex. distribution à la demande ou au "tour d'eau", droits d'eau des usagers, coût de l'accès à l'eau) ou les règles de gestion de crise (arrêté sécheresse par décision préfectorale, gestion de conflit entre usagers, etc.). Nous ajouterons à cette définition, de manière non exhaustive, les dimensions climatiques, agronomiques (le sol, les cultures), hydrologiques (ressource en eau de surface ou souterraine), socio-économiques (des usagers, des exploitations, de leur environnement) et environnementales (les écosystèmes impactés par le processus d'irrigation, positivement comme négativement).

Nous comprenons que la notion de système irrigué est multiple et complexe. Aussi nous définirons dans la suite de ce manuscrit le système irrigué comme une entité théorique représentant les objets, flux, acteurs et leurs interactions intervenant dans le processus d'irrigation. Ainsi les systèmes représentés pourront varier au gré des échelles, de la plante irriguée au bassin versant, et des dimensions considérées.

L'histoire de l'irrigation est intimement liée à celle de l'agriculture. Il y a 5000 ans, peu après la révolution agricole néolithique, le développement des premières civilisations hydro-agricoles s'est appuyé sur la maîtrise de l'eau pour former les premiers systèmes agraires hydrauliques dans les vallées du Tigre, de l'Euphrate, du Nil et de l'Indus (Mazoyer et Roudart, 1997). Ainsi dans les environnements arides ou semi-arides, l'agriculture de décrue puis les aménagements successifs pour assurer la répartition de ces eaux dans le temps et dans l'espace ont permis de sécuriser la production agricole. La pratique de l'irrigation s'est ensuite répandue dans les étages climatiques aux précipitations limitées ou uniformément distribuées, dans le bassin méditerranéen et les environnements sub-humides. Depuis la fin du *XIX*^e siècle, l'agriculture irriguée mondiale a connu une expansion considérable, sur tous les continents, associée dans un premier temps au développement de la grande hydraulique publique et la construction des barrages-réservoirs, et plus récemment à la démocratisation des systèmes de pompage qui a donné accès aux ressources souterraines et au transport de l'eau sous pression. Ainsi selon la FAO (2022), le pourcentage de surfaces irriguées par rapport aux surfaces cultivées mondiales est passé de 10% à plus de 20% au cours des 60 dernières années. Aujourd'hui, les surfaces irriguées représentent environ 330 millions d'hectares, dont 30% à partir de la ressource en eau souterraine, produisent environ 45% de l'approvisionnement alimentaire et sont à l'origine de 70% des prélèvements en eau douce à l'échelle mondiale. Cette intensification de l'agriculture par la pratique de l'irrigation n'est pas sans conséquences. De fait, la durabilité des systèmes irrigués est menacée, par une tension croissante sur la ressource en eau en raison des pressions anthropiques grandissantes et des changements climatiques d'une part, et par la dégradation de l'environnement causée

par une sur-intensification des systèmes de production d'autre part (Perret et Payen, 2020). De nombreux systèmes irrigués, notamment dans la région méditerranéenne (Ali et al., 2022), sont ainsi exposés à des déséquilibres majeurs, qui relèvent de la dimension qualitative de l'eau (salinisation des sols et des eaux, pollutions) et de sa dimension quantitative (épuisement des eaux souterraines, fermeture des bassins versants), ces déséquilibres survenant rarement de manière isolée. Dès lors, de quels leviers disposent les systèmes irrigués afin de produire sans détruire ?

1.1.2 Quels leviers pour des systèmes irrigués durables ?

Réduire le besoin en eau d'irrigation

Quelle que soit l'échelle d'analyse, le premier grand levier d'action à notre disposition en vue d'améliorer les performances des systèmes irrigués consiste à réduire le besoin en eau d'irrigation. Cet objectif peut être atteint de différentes manières, la première étant la rationalisation de l'assolement. Les stratégies d'assolement doivent être pensées dans l'espace, en privilégiant les systèmes de culture dont les besoins en eau sont adaptés au contexte pédo-climatique (Olesen et al., 2011). Ces premières peuvent aussi s'opérer dans le temps, en ajustant par exemple les calendriers culturaux vis à vis des conditions climatiques (Farooq et al., 2019). Les pratiques de conservation de l'eau du sol (*soil water conservation*) sont également mobilisables, afin par exemple de limiter l'évaporation par paillage (Cai et al., 2022) ou en réduisant le travail du sol (Canet-Martí et al., 2023), d'augmenter la réserve utile du sol par amendement organique (Edeh et al., 2020), ou encore de favoriser l'infiltration des eaux de pluie (Wang et al., 2018). L'usage de couverts végétaux peut permettre de réduire le ruissellement des eaux de pluie et favoriser leur infiltration, et sa destruction avant la saison sèche peut limiter la compétition hydrique avec les cultures (Novara, Cerda et al., 2021). Certaines études ont par ailleurs souligné l'influence du micro-climat à l'échelle infra parcellaire, et les possibilités de gestion de l'ombrage pour réduire l'évapotranspiration durant les pics de chaleurs (Ramos-Fuentes et al., 2023).

Faire un meilleur usage de l'eau d'irrigation disponible

Une autre voie de l'amélioration des performances des systèmes irrigués consiste à tenter de faire une meilleure utilisation de l'eau d'irrigation disponible. A l'échelle de l'exploitation agricole, les performances de l'irrigation sont principalement déterminées par des variables "technologiques", propres au système d'irrigation (l'équipement et son dimensionnement) et par des variables propres au pilotage de l'irrigation (calendrier et doses d'irrigation, maintenance). De nombreuses études se sont attachées à comprendre et optimiser les performances technologiques des différents systèmes d'irrigation.

L'irrigation de surface (par submersion, à la raie ou à la planche) repose sur l'écoulement gravitaire des flux d'eau, ce pourquoi elle est généralement décrite comme plus contraignante en main d'oeuvre, mais moins gourmande en énergie que les autres systèmes (Daccache, 2014). L'amélioration de ses performances "technologiques" repose sur l'optimisation de la géométrie (largeur, longueur, pente) des parcelles et la maîtrise des débits injectés (González-Cebollada et al., 2016 ; Nie, Li et al., 2019 ; Anwar et al., 2016 ; Morris et al., 2015).

Au contraire, les performances technologiques de l'irrigation par aspersion (à l'enrouleur ou au pivot) dépendent principalement de la pression disponible, de l'espacement, du débit et de l'angle des asperseurs, et des conditions de vent (Lamaddalena et al., 2007). Cette technologie permet d'irriguer des terrains à la topographie difficile, et se distingue des autres systèmes par la mobilité de l'équipement qui limite de fait les investissements nécessaires à l'hectare.

Enfin, les principales variables pouvant influencer les performances technologiques de l'irrigation localisée (goutte-à-goutte ou micro-aspersion) sont les variations de pression et le niveau technologique des équipements (ex. goutteurs classiques versus auto-régulants), et leur maintenance (ex. effets de colmatage, Liu et al. (2019) et Fan et al. (2008)). Cette technologie est appréciée en raison de sa facilité d'installation à l'échelle individuelle. Son installation représente également une opportunité pour l'application des fertilisants (fertigation), et son opération est relativement peu exigeante en main d'oeuvre.

De manière générale, chaque système d'irrigation s'accompagne d'avantages et de contraintes techniques qui lui sont propres. Les résultats obtenus par Serra-Wittling et al. (2019b) ont montré que les gains de performance liés à des changements d'équipements étaient variables, et difficilement extrapolables car dépendants de facteurs non technologiques. Il est par ailleurs peu pertinent de comparer les performances technologiques des systèmes d'irrigation en l'absence d'éléments de contexte. L'importance des pratiques de l'utilisateur, en revanche, est commune à tous les systèmes et s'avère parfois davantage déterminante que les performances théoriques des équipements (Benouniche, Kuper et al., 2014 ; Akakpo, 2021). Ce constat nous amène à nous interroger sur les outils d'aide à la décision disponibles pour la gestion opérationnelle de l'irrigation.

L'irrigation de précision peut être définie comme une gestion de l'eau agricole dont les stratégies s'appuient sur des technologies de l'information pour intégrer des données provenant de sources multiples dans les décisions liées au pilotage de l'irrigation (National Research Council, 1997). La recherche s'est particulièrement intéressée à ce sujet au cours des dernières décennies, notamment pour répondre à cette question pratique : à quel moment et dans quelle quantité irriguer ? L'aide à la décision pour la gestion de l'irrigation peut ainsi s'appuyer sur une grande diversité d'outils qui comprend les systèmes d'automatisation, les modèles numériques de bilan hydrique, et les capteurs, satellitaires ou au champ, pour le suivi des variables biophysiques. Nous en donnerons une vue d'ensemble ci-dessous.

Aide à la décision basée sur les bilans hydriques

De nombreux modèles basés sur la méthode du bilan hydrique (*soil water balance models*) ont été développés pour évaluer le besoin en eau des cultures et accompagner la prise de décision concernant le calendrier d'irrigation (L. Pereira et al., 2020). Sans faire de liste exhaustive, nous pouvons citer dans cette première catégorie les modèles populaires de la FAO, CROPWAT (M. Smith et U. N. FAO, 1992) et AQUACROP (Raes et Geerts, 2007), ou encore STICS (Brisson et al., 2003 ; Brisson, 2009)), qui peut notamment être utilisé pour simuler les effets d'un

couvert (paillage, couvert végétal) sur les flux d'eau (Meyer, Bergez, Constantin et al., 2020 ; Meyer, Bergez, Justes et al., 2022) , et OPTIRRIG (Cheviron et al., 2020) qui comprend un module "efficiences" à différentes échelles. Ces modèles sont souvent basés sur une représentation simplifiée des transferts d'eau dans le sol, représenté à partir d'un ou plusieurs réservoirs inter-connectés. Ils permettent de simuler une dynamique temporelle du stock d'eau et le développement de la culture, et sont donc bien adaptés pour évaluer les performances des stratégies d'irrigation.

Nous pouvons distinguer une seconde catégorie de modèles, qui permettent de simuler les dynamiques des transferts d'eau à l'échelle infra-parcellaire, au sein de la zone non saturée en eau du sol (*vadose zone*). Cette catégorie peut être illustrée par le modèle HYDRUS (1D ou 2D) (Simunek et al., 1996), ou le modèle WinSRFR (Bautista et al., 2009) pour la simulation des écoulements d'irrigation de surface. Ces modèles, quoique plus complexes à calibrer, permettent en revanche de représenter précisément les flux d'eau dans le sol (ex. infiltration, percolation profonde, ruissellement). Ils sont généralement utilisés à l'échelle temporelle de l'événement d'irrigation, et sont donc bien adaptés pour évaluer les performances des tactiques d'irrigation.

Les modèles biophysiques peuvent en outre être couplés à des modèles décisionnels, afin de prendre en compte les règles et contraintes de gestion pouvant émerger à l'échelle de l'exploitation agricole (Merot et Bergez, 2010), ou dans le cadre d'une gestion collective de la ressource (Richard et al., 2022).

Il existe ainsi une grande diversité de modèles numériques développés dans l'optique de comprendre ou d'accompagner la gestion stratégique et tactique de l'irrigation. Toutefois, ces modèles sont rarement paramétrés par les agriculteurs, et fournissent en conséquence des indications non spécifiques aux conditions de terrain, difficiles à utiliser pour la prise de décision en cours de saison d'irrigation (quelle parcelle irriguer, pendant combien de temps ou à quelle dose). Nous voyons ici la pertinence des systèmes de mesure directe des variables agro-hydrologiques, dont nous proposons de donner une vue d'ensemble ci-après.

Aide à la décision basée sur la mesure directe

Mesures directes au champ

Il existe une grande diversité de capteurs permettant la mesure au champ des variables climatiques et agro-hydrologiques pour accompagner le pilotage de l'irrigation.

Les stratégies d'irrigation peuvent s'appuyer sur la mesure des variables climatiques (précipitations, rayonnement, anémométrie, température, hygrométrie) et leur usage pour la détermination d'indicateurs sur les besoins en eau des cultures (ex. évapotranspiration de la culture, *ETc*). Ces variables sont généralement utilisées comme variables d'entrée des modèles de bilan hydrique précédemment mentionnés. Elles peuvent également être diffusées aux usagers de l'eau sous la forme de bulletins d'informations réguliers au cours de la saison d'irrigation.

Les stratégies et tactiques d'irrigation peuvent également s'appuyer sur la mesure au champ de l'état hydrique du sol. Ce dernier est souvent approché par la mesure de son potentiel hydrique au moyen de sondes tensiométriques, dont la mesure peut être basée sur (i) la dépression de l'eau contenue dans la bougie poreuse du tensiomètre, à l'équilibre avec le potentiel du sol, ou (ii) sur les variations de résistance électrique du sol (Delalande et al., 2017). Par ailleurs, l'humidité du sol peut être estimée au moyen de sondes capacitatives, sondes TDR (Time Domain Reflectometry) ou sondes FDR (Frequency Domain Reflectometry), dont la mesure est basée sur les propriétés di-électriques du sol (Evelt et al., 2012). Plusieurs études ont souligné les gains de performance atteignables grâce au pilotage de l'irrigation sur la base du suivi de l'état hydrique du sol (Serra-Wittling et al., 2019a ; Soulis et al., 2015a).

En outre, différents capteurs permettent d'estimer l'état de confort hydrique des cultures au champ à partir de la mesure de variables telles que le diamètre des organes végétaux (Ortuño et al., 2010), le potentiel foliaire ou la température foliaire (B. Molle et Bohorquez, 2020). Ces capteurs, onéreux et/ou complexes, sont plutôt destinés, sauf exception dans certains systèmes de production à forte capacité d'investissement, à des applications en recherche.

Mesures de l'état du sol et des cultures par proxy et télédétection

La multiplication des programmes spatiaux pour la production d'imagerie par télédétection, et l'accessibilité de leurs données (ex. programme Copernicus), représentent de nouvelles opportunités pour le suivi en temps quasi-réel des variables agro-hydrologiques à grande échelle. Les données d'imagerie aérienne, obtenues par drone ou par satellite, peuvent constituer des sources de variables d'état (ex. humidité du sol, évapotranspiration, usage du sol) et d'indicateurs (ex. indices de végétation, coefficients cultureux), à haute résolution spatiale et temporelle, utiles pour la calibration ou le forçage des modèles (Hamze et al., 2023; Courault et al., 2021), ou pour accompagner directement la prise de décision de l'utilisateur de l'eau (Hendrickx et al., 2016).

Suivi en temps réel des variables au champ

Les récentes avancées dans le domaine des technologies de l'information et de la communication (*ICT*) et de l'électronique embarquée, telles que l'internet des objets (*Internet of Things, IoT*), ouvrent la voie vers une multiplication des systèmes de mesure et des données disponibles en temps réel pour le suivi des agro-systèmes (OECD, 2019). Pour l'agriculture irriguée en particulier, ces technologies offrent des opportunités de suivi en temps réel des flux d'eau à travers le déploiement de réseaux de capteurs connectés (*wireless sensor network, WSN*) sur le terrain, à différentes échelles spatiales (parcelle, exploitation, périmètre irrigué). Plusieurs études ont démontré la faisabilité technique du suivi de l'irrigation basé sur ce type de systèmes, basés sur une diversité de réseaux de télécommunication et de capteurs pour la mesure de variables climatiques, de l'état du sol ou de la culture (Hamami et Nassereddine, 2020; Abioye et al., 2020; Zhang et al., 2022). Certaines études ont par ailleurs mentionné des gains de performance dans différents contextes agronomiques à partir de l'usage de tels outils de pilotage (Liao et al., 2021; Bwambale et al., 2022; Pramanik et al., 2022). A l'instar des produits de la télédétection, les données fournies par les réseaux de capteurs IoT peuvent être utilisées pour alimenter les modèles numériques, ou directement traitées et mises à disposition des agriculteurs et

usagers de l'eau, via des applications en ligne pour la visualisation des données ou des alertes par messagerie mobile (Todorovic et al., 2016 ; Car et al., 2012).

Pour autant, une grande partie de ces outils demeure réservée au domaine de la recherche, et s'avère sous-utilisée par les agriculteurs dans la pratique (Koech et al., 2021), en particulier pour les systèmes irrigués gravitaires et dans le Sud global (Stevens et al., 2005 ; Berthold et al., 2021). Les barrières à l'adoption de ces technologies d'irrigation de précision sont diverses, dépendantes du type d'outil et des environnements socio-techniques des usagers, mais sont généralement relatives à un manque d'accessibilité économique et/ou technique pour les usagers (Lamb et al., 2008 ; Tey et Brindal, 2012). Cette vue d'ensemble des leviers disponibles pour accompagner la gestion de l'eau agricole nous conduit naturellement à nous poser la question de leur efficacité : qu'est ce que la performance des systèmes irrigués et comment l'évaluer ?

1.1.3 A propos de la notion de performance

La recherche se pose la question de la performance des systèmes irrigués depuis plusieurs décennies. Chercher à évaluer et améliorer les performances d'un système revient à tenter de mesurer et réduire l'écart entre une situation idéale et sa réalité. Cette question a été largement traitée par la littérature, qui s'est attachée à produire une diversité de méthodes pour l'évaluation et la comparaison des performances de l'irrigation. Selon les perspectives, et selon les contextes, les objectifs visés (la "situation idéale") par l'amélioration des performances peuvent être agronomiques, économiques, sociaux, environnementaux ou politiques, et de ces objectifs initiaux, intimement liés aux acteurs impliqués, dépendront la définition de performance employée. Nous détaillerons ci-dessous les principaux concepts liés à la notion de performance, sur lesquels nous poserons ensuite un regard critique.

Le concept d'**efficience de l'irrigation** (*irrigation efficiency, IE*), apparu au début du *XXe* siècle (Israelson, 1950), a été depuis largement utilisé dans le secteur de l'ingénierie pour le développement agro-hydraulique. De manière

générale, l'efficacité peut être définie comme le rapport entre les volumes d'eau "bénéfiques" et les volumes d'eau "utilisés" :

$$IE (\%) = \frac{\text{Volume 'bénéfique'}}{\text{Volume 'utilisé'}}$$

Très largement étudié depuis les années 1980, le concept a été décliné sous la forme de nombreux indicateurs, variants selon les échelles d'étude et les interprétations du numérateur et du dénominateur. Cette diversité d'indicateurs, regroupée sous l'appellation d'efficacités de l'irrigation (*IEs*), peut être appréhendée à travers deux courants principaux : les efficacités d'irrigation classiques (*CIE*) et les efficacités à dimension plus intégrative, ou "efficacités d'irrigation effectives" (*EIE*) d'après Lankford (2006).

La conception classique de l'efficacité d'irrigation repose sur le calcul de l'efficacité de l'irrigation pour les différentes unités composant le système irrigué (Bos et Nugteren, 1990). Ainsi sont distinguées l'efficacité d'application de l'irrigation au champ, des efficacités de distribution qui évaluent l'efficacité du réseau d'irrigation pour transporter l'eau d'un point amont (ex. réservoir, prise du réseau secondaire) jusqu'à un point aval (ex. prise du réseau tertiaire, entrée de parcelle). L'efficacité d'application (*AE*) peut ainsi être calculée comme le rapport entre le volume d'eau stocké dans la zone racinaire et le volume d'eau d'irrigation appliqué. L'efficacité de distribution (*DE*) est calculée aux différentes échelles du réseau comme le rapport entre les volumes délivrés au point aval et les volumes prélevés en amont. L'efficacité classique d'irrigation à l'échelle du périmètre est ensuite calculée comme le produit des efficacités d'application et de distribution. Ainsi les efficacités classiques ont été largement utilisées par l'ingénierie hydraulique pour le design des périmètres irrigués, comme indicateur des performances hydrauliques des systèmes de distribution et d'application (Perry, 2007). Bien que propice aux incertitudes, d'un point de vue méthodologique par la difficulté des mesures et la subjectivité du "volume bénéfique" au numérateur, et mathématiquement par la multiplication des incertitudes lors du changement d'échelle (Lankford, 2006), cette méthode reste une référence dans de nombreux

ouvrages et les ordres de grandeur suivants sont souvent utilisés pour décrire les performances des différents systèmes d'irrigation (Gilley et Watts, 1977) :

- Irrigation de surface via canaux à surface libre : $30 < IE < 70$
- Irrigation par aspersion via réseau sous pression : $60 < IE < 90$
- Irrigation localisée : $75 < IE < 95$

Face aux limites des efficacités classiques, le courant néo-classique a proposé de dépasser la perspective "ingénieur" et les "économies d'eau de papier" en reconsidérant les volumes considérés comme "bénéfiques". Le concept d'efficacité effective de l'irrigation (*EIE*) est ainsi né de la volonté de prendre également en compte les flux d'eau d'irrigation utiles ou ré-utilisables (ex. utiles au lessivage des sols salins, à condition que les eaux soient de bonne qualité), et s'est traduit par le développement d'une nouvelle diversité d'indicateurs d'efficacité selon les perspectives (A. Keller et J. Keller, 1995 ; Burt et al., 1997). Pour autant, ces tentatives d'adaptation de l'efficacité d'irrigation sont souvent sources de confusion, dans la mesure où les changements de perspective et d'échelles peuvent radicalement changer la signification et les ordres de grandeur de l'indicateur (Guillet, 2006). Ainsi l'usage des efficacités classiques est parfois préféré, en limitant clairement l'interprétation des efficacités comme des indicateurs du fonctionnement technologique des systèmes d'irrigation au champ (AE) et pour la distribution à travers le réseau (DE) (Van Halsema, Keddi Lencha et al., 2011).

Par ailleurs, des indicateurs alternatifs ont été proposés afin d'évaluer d'autres aspects de la performance des systèmes irrigués. C'est le cas par exemple de l'efficacité "relative à la demande" (*requirement efficiency, RE*), calculée à l'échelle parcellaire comme le rapport entre le volume stocké dans la zone racinaire au terme de l'irrigation et le déficit hydrique du sol avant irrigation (Zerihun et al., 1996). Cet indicateur peut également être mesuré à l'échelle du périmètre irrigué, où il est plus connu sous le nom d' "alimentation en eau relative" (*relative water supply, RWS*, aussi trouvé sous la forme *relative irrigation supply, RIS*), comme le rapport [volume d'eau apporté]/[besoins en eau des cultures] (Rodríguez-Díaz et al., 2008 ; Van Halsema, Keddi Lencha et al., 2011). Ces indicateurs permettent ainsi d'évaluer l'adéquation des systèmes et pratiques d'irrigation par rapport à

la demande en eau. Ils sont considérés par Van Halsema et Vincent (2012) comme complémentaires avec les efficacités classiques, dans la mesure où la combinaison du calcul des RWS et IE aux différentes échelles spatiales et temporelles d'un système irrigué représente un instrument utile pour caractériser à la fois l'efficacité et l'adéquation de l'irrigation, et par ce biais les performances technologiques, techniques et institutionnelles de la gestion de l'eau agricole.

Pour autant, l'utilisation de l'efficacité de l'irrigation comme indicateur de performance, quelle que soit sa forme, restreint l'analyse à un raisonnement exclusivement fondé sur l'allocation des volumes d'eau. La recherche d'indicateurs de performance permettant d'évaluer et de comparer dans leur diversité les bénéfices tirés de l'usage de l'eau a conduit au concept de **productivité de l'eau** (**WP**). Cette notion se définit comme le rapport entre les produits dérivés de l'usage de l'eau, et les volumes d'eau consommés :

$$WP = \frac{\textit{produit}}{\textit{volumes 'consommés'}}$$

Contrairement à la notion d'efficacité, il s'agit par conséquent d'un indicateur présentant une unité [$\textit{produit} \cdot \textit{volume}^{-1}$]. L'indicateur de la productivité de l'eau, souvent associé à la formule "*more crop per drop*" (Giordano et al., 2006), a gagné en importance dans la littérature au cours des années 2000. Son utilisation permet d'évaluer les performances d'une agriculture qui doit augmenter sa production sans élévation majeure des volumes d'eau prélevés (De Fraiture et al., 2010; Molden, Oweis et al., 2010). Dans ce sens, le produit au numérateur prend souvent la valeur du rendement agricole ($\textit{kg} \cdot \textit{ha}^{-1}$) et le dénominateur la valeur des volumes d'eau d'irrigation appliqués par hectare (productivité de l'eau agricole, *agricultural water productivity*, WPa , en $\textit{kg} \cdot \textit{m}^{-3}$).

Une notion dérivée, et souvent source de confusion (Perry, 2007), est l'efficacité d'utilisation de l'eau (*water use efficiency*, WUE). Sous l'appellation d'efficacité, il s'agit en fait souvent d'une mesure de productivité, lorsqu'elle est calculée par exemple à l'échelle de la plante comme le rapport entre le rendement et l'évapotranspiration réelle (ETa), témoignant ainsi des performances physio-

logiques (facteurs génétiques, tolérance au stress hydrique, etc.) d'une culture (Steduto et al., 2007).

Un avantage de la productivité de l'eau comme indicateur de performance réside dans sa capacité à être comparable dans le temps et entre différents contextes géographiques (Zwart et Bastiaanssen, 2004). En outre, le caractère générique du numérateur autorise les analyses de performance multi-critères des systèmes irrigués. Ainsi la productivité de l'eau a pu être déclinée sous différentes formes, afin d'évaluer les performances socio-économiques de l'irrigation par exemple, avec la productivité de l'eau économique (*economic water productivity*, WPe , en $\$.m^{-3}$, (Molden, Sakthivadivel et al., 1998; Knox et al., 2000) ou sa productivité nutritionnelle (*nutritional water productivity*, en $calories.m^{-3}$, (Renault et Wallender, 2000). Des méthodes de valorisation économique de l'eau (*water valuation*) ont par ailleurs été proposées dans l'optique d'inclure les valeurs environnementales et sociales de l'eau dans le calcul de sa productivité, pour une gestion plus intégrée de la ressource (Turner, 2004).

Bien que largement utilisés, les méthodes et indicateurs proposés présentent un certain nombre de limites, tant dans leur évaluation que dans leur interprétation. De fait, les variables impliquées dans le calcul des efficacités de l'irrigation peuvent s'avérer difficiles à mesurer en pratique (M. Jensen, 2007). En outre, leur usage peut facilement entraîner des erreurs d'interprétation si l'on omet le fait que les efficacités permettent d'évaluer la performance d'une technologie d'irrigation, ni plus, ni moins (Van Halsema et Vincent, 2012; Kooij et al., 2013). L'évaluation de la productivité de l'eau s'est montrée avantageuse dans la mesure où elle permet de comparer les usages de l'eau dans le temps et selon plusieurs dimensions. Pour autant, cet avantage peut également être source d'inconvénients, ou du moins de risques d'interprétation abusive. De fait, les productivités peuvent donner des indications contradictoires, ainsi par exemple une culture de rente sera probablement plus performante qu'une culture céréalière au regard de la productivité économique (WPe), mais peut être moins performante au regard de la productivité de l'eau agricole (WPa). En outre, si la productivité de l'eau est comparable dans le temps, cela en fait une variable à surveiller plutôt

qu'un indicateur fixe, en particulier dans le cas de la WPe qui est dépendante des contextes économiques d'une part, et sensible aux variations de marché d'autre part (Hermans et al., 2006).

Au delà des limites propres aux indicateurs utilisés, l'évaluation des performances de l'irrigation demeure fondamentalement une question de perspectives. Le calcul d'une efficacité implique de distinguer les volumes d'eau "bénéfiques" des volumes "perdus". De manière analogue, le calcul d'une productivité demande d'identifier les produits de l'irrigation et d'en distinguer les plus bénéfiques et les moins prioritaires. La subjectivité de ces notions a conduit la littérature à identifier différents paradoxes nés de la recherche de performances. Les **effets d'échelle** traduisent le fait que les économies d'eau à une échelle spatiale donnée (parcelle, exploitation agricole, périmètre irrigué) n'entraînent pas nécessairement d'économies réelles à des échelles spatiales supérieures (bassin ou sous-bassin versant). Ainsi Seckler (1996) appelait à distinguer les économies d'eau sur le papier (*"dry" or "paper" water savings*) des économies d'eau réelles (*"wet" or "real" water savings*). Ce paradoxe peut s'observer lorsque les évaluations de performance sont concentrées sur une seule échelle spatiale, dans une perspective "propriétaire" (Van Halsema et Vincent, 2012), i.e. sans réaliser que l'eau "perdue" à petite échelle (par exemple ruissellement, ou percolation profonde) peut s'avérer, dans certaines conditions, être "bénéfique" à l'échelle du bassin versant (Grafton et al., 2018). **L'effet rebond**, aussi connu comme paradoxe de Jevons (Alcott, 2005), correspond à des situations dans lesquelles la recherche d'amélioration des performances de l'irrigation se traduit finalement par une augmentation de la pression sur la ressource. Plusieurs études ont ainsi souligné l'incapacité des politiques de modernisation des systèmes d'irrigation à limiter les prélèvements en eau à l'échelle du bassin versant, dans différents contextes (Wheeler et al., 2020; F. Molle et Tanouti, 2017; Perry et al., 2017; Venot, Kuper et al., 2017). Berbel et Mateos (2014) ont discuté de cet effet rebond au regard de l'expérience de modernisation de l'irrigation espagnole, et ont identifié l'extension des surfaces irriguées comme son principal déterminant, autrement dit que la modernisation des systèmes devait s'accompagner d'une régulation du foncier irrigué afin de

s'en prémunir. Les **paradoxes inter-dimensionnels** sont décrits par Lankford et al. (2020) comme la production de résultats contradictoires lors du passage d'une dimension à une autre. Ce type de paradoxe est bien illustré par les travaux de Daccache (2014) et Belaud et al. (2020), qui mettent en évidence les compromis du nexus eau-énergie-alimentation (*water-energy-food nexus*) qu'impliquent la modernisation des systèmes irrigués en Méditerranée.

Ces considérations sur la notion de performance des systèmes irrigués, et particulièrement sur ses limites, nous invitent à concevoir la finalité de la quête de performances comme la recherche d'un équilibre, qui impliquera nécessairement des compromis entre les différentes dimensions agronomiques, hydrologiques, socio-économiques et environnementales composant ces systèmes, de la parcelle au bassin versant.

Nous avons vu dans cette section les grands enjeux de l'agriculture irriguée, et les efforts de la recherche pour y répondre en produisant une diversité de savoirs, des technologies, de méthodes et d'outils. Néanmoins, l'agriculture est avant tout une affaire d'agriculteurs, aussi, comment décloisonner l'innovation agricole ?

1.2 Innover pour et avec les agriculteurs

1.2.1 La co-conception : une démarche d'innovation participative

A partir du constat que l'innovation agricole suivait une approche trop *top down* (Cerf et al., 2012), à l'origine d'un décalage entre les décisions d'en haut et les applications d'en bas, les méthodes de conception participative (*participatory design*) proposent de placer l'agriculteur au coeur du processus d'innovation (Meynard et al., 2012 ; Prost, 2021 ; Toffolini et al., 2020). Plusieurs études ont ainsi travaillé à la co-conception de systèmes de culture (Queyrel et al., 2023 ; Luján Soto et al., 2021 ; Drain et al., 2019) ou de machinisme agricole (Gregg et al., 2020) dans différents contextes agraires. La co-conception peut en outre servir d'approche pour des réflexions collectives et multi-acteurs sur la gestion

d'un territoire rural, notamment pour la gestion intégrée de la ressource en eau, en utilisant des supports de participation cartographiques (Murgue et al., 2015), ou des jeux sérieux (Venot, C. B. Jensen et al., 2022). Du désir de faire émerger l'innovation des territoires sont récemment nés les *living labs* pour les agroécosystèmes, qui rassemblent une diversité d'acteurs pour imaginer une agriculture plus durable à l'échelle du territoire (McPhee et al., 2021 ; Bergez et al., 2022). Si les initiatives de co-conception d'outils numériques pour l'agriculture tendent à se multiplier dans les pays occidentaux (Kenny et al., 2021), notamment *via* la création de fermes pilotes (Bergez et al., 2022 ; Crestey et al., 2022), elles restent plus rares dans le Sud global (McC Campbell et al., 2022).

1.2.2 Bricolage et low-tech numérique

L'innovation n'est pas l'apanage des chercheurs et des ingénieurs. Depuis l'invention de la charrue, et plus encore depuis la multiplication des technologies agricoles liée à sa mécanisation, les agriculteurs s'approprient, inventent ou ré-inventent les outils pour les adapter à leurs usages et à leurs besoins. Ce "bricolage", défini par Pascon (1980) comme l'action de "faire du nouveau avec des bouts d'ancien", peut se faire par nécessité économique, pour éviter de payer le remplacement d'une pièce, mais s'avère bien souvent être une nécessité d'adaptation technique, face à la standardisation industrielle des agro-équipements. Assez peu documentée dans la littérature scientifique, cette démarche s'exprime en France à travers des initiatives telles que l'Atelier Paysan, coopérative d'auto-construction de machinisme agricole (Goulet et al., 2022). Kefi et al. (2023) ont récemment proposé une méthode d'analyse des réseaux sociaux pour mettre en évidence le partage d'informations lié au bricolage des agro-équipements entre agriculteurs. Darnhofer et al. (2016) identifient le bricolage comme l'un des facteurs de résilience des petites exploitations familiales européennes. Pour l'agriculture irriguée, cette aptitude a été documentée au Maroc par Errahj et al. (2006) comme moyen d'adaptation de l'agriculture familiale à la grande hydraulique, et par Benouniche, Zwarteveen et al. (2014) comme un moyen de ré-appropriation de la technologie du goutte à goutte.

En opposition aux produits de haute technologie "*high-tech*", la notion de "*low-tech*" s'est imposée ces dernières années pour caractériser les recherches d'alternatives au modèle dominant dans les domaines variés de l'énergie, de la gestion des déchets, de l'habitat, des matériaux, des transports mais aussi de l'agriculture. Au delà de la définition réductrice donnée par le *Cambridge Dictionary*, qui associe l'adjectif low-tech à "l'usage de machines, équipements et méthodes qui ne sont pas les plus avancées", Sirois-Cournoyer (2018) propose la définition suivante : une technique "soutenable" (au sens de durable), accessible, favorisant l'autonomie de son utilisateur et adaptable à différents contextes. Cette définition se rapproche du concept de "bricolage" évoqué précédemment ou de l'approche "*do it yourself (DIY)*" (Sarpong et al., 2020), dans la mesure où elle suggère une ré-appropriation de la technologie par l'utilisateur. Elle introduit par ailleurs la question de sa durabilité : i) à l'échelle locale, elle implique que la technologie soit réparable, et ii) à l'échelle globale elle implique que la technologie soit économe en ressources naturelles et non polluante. Aussi, le numérique peut-il être low-tech ? Les technologies numériques de l'information sont souvent conçues comme des "boîtes noires" standardisées, peu accessibles techniquement et économiquement. Elles sont également critiquées pour leur obsolescence, pour la masse de données (*Big Data*) et les émissions de gaz à effet de serre que leur stockage génère, et pour l'extraction des ressources naturelles, métaux et terres rares, dont elles dépendent (Del Río Castro et al., 2021). Pour autant, les progrès du numérique ont également conduit au développement d'une micro-électronique accessible économiquement, et reposant sur une programmation logicielle Open Source (*The Open Source Initiative* 2006). Cette démarche, associée aux avancées dans les réseaux de télécommunication pour l'internet des objets (*IoT*), permet de concevoir des technologies numériques de l'information à faible consommation énergétique et impliquant de plus petits volumes de données (Carvalho Silva et al., 2017 ; Zhao et al., 2023). Le développement de l'IoT s'est également accompagné de la formation d'une vaste communauté mondiale, mêlant professionnels et amateurs, qui favorise le partage et la maintenance des nouvelles technologies numériques. Cette démocratisation du bricolage numérique est également renforcée

par le développement de la technologie de l'impression 3D, et la multiplication des espaces collectifs de création (*makerspaces*) (Beltagui et al., 2021). Tout ces aspects illustrent la possibilité d'un numérique alternatif low-tech, fait de technologies davantage "boîtes blanches", plus accessibles, concevables, adaptables et réparables par l'utilisateur.

1.3 Méthodologie générale

1.3.1 Problématique

La grande diversité d'outils d'aide à la décision existants témoigne des efforts considérables de la recherche pour apporter des solutions à la problématique essentielle de la prise de décision pour la gestion stratégique et tactique de l'eau d'irrigation. Les nouvelles technologies d'information de masse représentent des opportunités pour mieux comprendre et mieux gérer la ressource dans l'espace et dans le temps. Pour autant, l'usage d'une grande partie de ces systèmes de mesure demeure réservé aux domaines de la recherche et de l'ingénierie, et les outils d'aide à la décision pour la gestion de l'eau agricole restent sous-utilisés dans la pratique, en particulier dans les systèmes irrigués gravitaire et dans le Sud global. Par ailleurs, le développement de nouvelles technologies pour améliorer les performances des systèmes irrigués peut conduire à des déséquilibres à plus grande échelle si les effets de leur adoption ne sont pas considérés. Dès lors, nous nous poserons la question suivante :

Dans quelle mesure le développement participatif de technologies numériques pour l'information peut-il aboutir à de nouveaux outils utiles et accessibles pour améliorer les performances des systèmes irrigués et contribuer à une meilleure durabilité des territoires ?

1.3.2 Stratégie de recherche

A la lumière de ces considérations et de notre question de recherche, nous nous donnerons l'objectif général suivant :

Développer des innovations numériques utiles et accessibles aux systèmes irrigués pour accompagner la gestion de l'eau en agriculture et contribuer à une meilleure durabilité des territoires.

Nous chercherons à répondre à cet objectif général en ancrant nos travaux au sein de deux territoires dans lesquels les pratiques d'irrigation impactent fortement le cycle de l'eau, et en formulant trois questions de recherche et objectifs spécifiques associés :

Questions de recherche et objectifs spécifiques associés

Question 1. Comment orienter la recherche de performances des systèmes irrigués pour éviter les déséquilibres à l'échelle territoriale ?

Objectif 1. Comprendre les contextes agraires et hydrologiques de deux territoires irrigués et représenter leur fonctionnement.

Question 2. Dans quelle mesure, et sous quelles formes, les technologies numériques de l'information peuvent-elles être façonnées par les territoires pour contribuer à cette recherche de performances ?

Objectif 2. Concevoir, expérimenter et évaluer de nouvelles technologies pour la gestion de l'eau au sein des territoires irrigués.

Question 3. Comment évaluer les effets de l'adoption de ces nouvelles technologies sur les performances des systèmes irrigués, en tenant compte de leurs implications à plus large échelle ?

Objectif 3. Déterminer une méthode pour évaluer les effets de l'adoption des nouvelles technologies sur les performances globales des systèmes irrigués.

Afin de répondre à ces questions, nous proposons d'appliquer une stratégie de recherche en trois temps (S1, S2, S3) :

S1. Nous supposons qu'aborder la première question de recherche (Q1) demande une compréhension fine des agro-hydrosystèmes. Nous faisons l'hypothèse (H1) que les contextes agraires et hydrologiques influencent grandement l'orientation à donner à la recherche de performances des systèmes irrigués. Nous ciblerons donc deux territoires irrigués méditerranéens confrontés à de forts enjeux de durabilité vis-à-vis de la ressource en eau, et nous chercherons à appréhender et représenter leur fonctionnement (O1). Pour répondre à cet objectif, nous nous appuyerons sur la méthode du diagnostic agraire. Le diagnostic agraire est une méthode d'analyse systémique qui mobilise plusieurs disciplines (géographie, histoire, agronomie, économie, sociologie) et qui permet d'appréhender les dynamiques agricoles passées et de représenter le fonctionnement actuel d'un territoire agricole à plusieurs échelles : le système agraire (échelle territoriale), le système de production (échelle de l'exploitation) et les systèmes de culture et d'élevage (échelle parcellaire). Les résultats de cette première étape de la thèse guideront la suite du projet.

S2. A travers la seconde question de recherche (Q2), nous faisons les hypothèses suivantes : (i) l'accès à l'information à un niveau sans précédent, *via* des capteurs à bas coût et de l'information facilement accessible en ligne, peut constituer un levier majeur pour mieux identifier les gains de performance atteignables, à différentes échelles spatiales et temporelles, et guider le choix des acteurs vers des pratiques plus durables (H2.1) ; (ii) de plus, un changement de paradigme, du transfert de technologie *top-down* vers une innovation *bottom-up* est nécessaire afin de rendre l'irrigation de précision plus accessible et plus adaptée à la réalité des systèmes irrigués (H2.2). Nous chercherons à concevoir, expérimenter et évaluer des innovations technologiques pour la gestion de l'eau au sein des territoires irrigués (O2). Nous nous appuyerons sur une démarche participative avec la création d'environnements favorables à l'innovation collaborative (les Water user Fab Labs), pour la co-conception des innovations et leur expérimentation en conditions réelles.

S3. A travers notre troisième question de recherche (Q3), nous faisons l'hypothèse que la performance des systèmes irrigués ne peut pas être limitée à la notion exclusive d'efficacité de l'irrigation à l'échelle de la parcelle, ou de la productivité de l'eau, au risque de se diriger vers une promotion systématique de techniques coûteuses avec de nombreux effets induits (H3). Nous chercherons à déterminer une méthode afin d'évaluer les changements de performance des systèmes irrigués rendus possibles par les innovations développées (O3). Nous nous appuyerons sur une approche multi-critère et multi-échelle, et tenterons de répondre à cet objectif au moyen de suivi expérimental et d'outils de simulation numérique.

Une représentation schématique de l'organisation de la stratégie de recherche dans le temps et dans l'espace est donnée figure 1.1. Nous chercherons par ailleurs, de manière complémentaire, à dégager de cette expérience des perspectives sur le potentiel d'adoption et de diffusion des innovations développées.

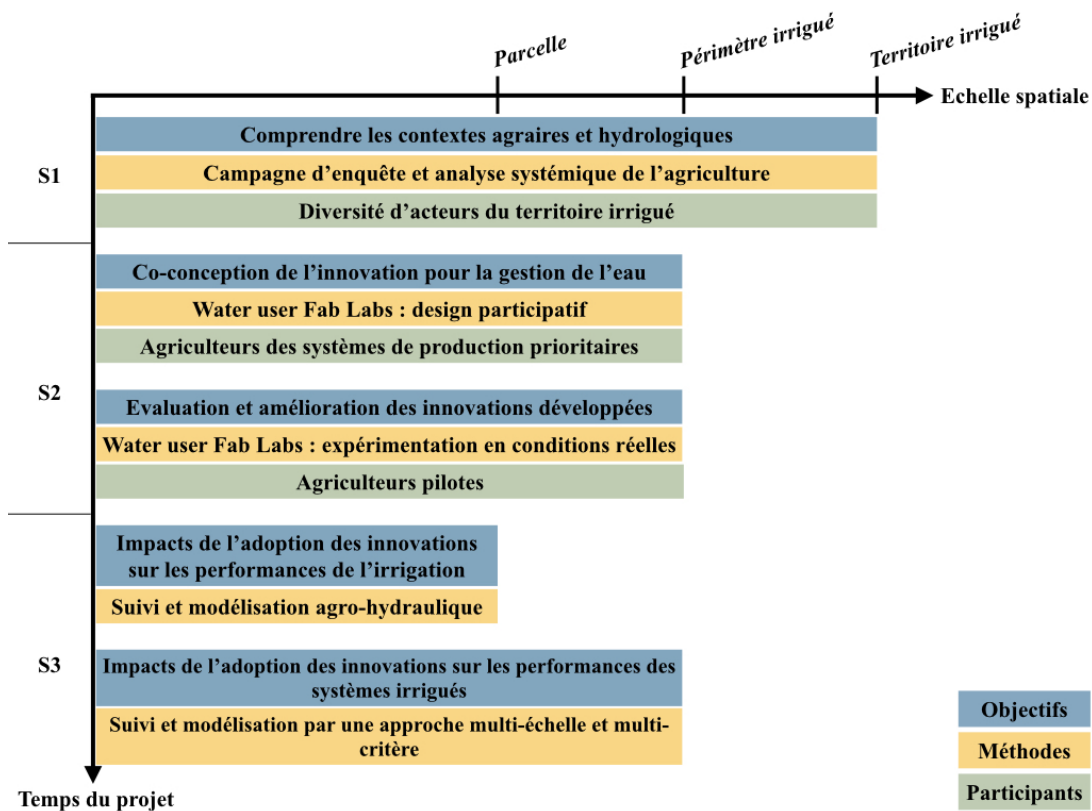


FIGURE 1.1 – Schéma de méthodologie générale de la thèse. S1, S2 et S3 = 1ère, 2nde et 3ème étapes de la stratégie de recherche.

1.3.3 Plan de la thèse

Nous verrons dans le Chapitre 2 comment la mise en oeuvre de la première stratégie de recherche (S1) a permis d’appréhender les contextes agraires et les contraintes locales de gestion de l’eau propres à deux territoires irrigués méditerranéens en Provence, France et au Cap Bon, Tunisie. Nous décrirons également le fonctionnement des Water user Fab Labs, environnements pour la conception participative de l’innovation. Ces éléments serviront de préalable à la réalisation de la seconde stratégie de recherche (S2), qui a conduit au développement et à l’expérimentation de nouvelles technologies numériques pour la gestion de l’irrigation, et dont les résultats seront présentés dans le Chapitre 3. Finalement, les implications de l’adoption de ces innovations seront étudiées à travers le Chapitre 4, où nous discuterons dans un premier temps de leur potentiel d’adoption et de diffusion sur la base de l’expérience des deux sites d’étude, avant de chercher à évaluer les évolutions de performances des systèmes irrigués induites par l’innovation. Ce dernier point, qui s’inscrit dans la troisième stratégie de recherche (S3), sera abordé à travers l’exemple du site d’étude français, au moyen d’une approche par modélisation multi-échelle et multi-critère.

Chapitre 2

Façonner l'innovation pour l'adapter aux territoires irrigués

Table des matières

2.1	Introduction du Chapitre 2	33
2.2	Appréhender les contextes agraires et les contraintes locales de gestion de l'eau	35
2.2.1	Etude intégrée de deux territoires irrigués méditerranéens .	35
2.2.2	La plaine agricole d'El Haouaria : contexte géographique, climatique et socio-économique	36
2.2.3	La plaine de la Crau : contexte géographique, climatique et socio-économique	42
2.2.4	La plaine d'El Haouaria, une durabilité menacée par la sur-exploitation des ressources en eau souterraines	46
2.2.5	La plaine de la Crau, en recherche d'équilibre entre trans- fert d'eau en surface et recharge souterraine	53
2.2.6	Systèmes de culture irrigués	59
2.2.7	Systèmes de production	66



2.3	Water User Fab Labs : une approche participative pour concevoir l'innovation	70
2.3.1	Cristalliser la recherche d'alternatives	70
2.3.2	Les WFL en pratique : penser et expérimenter l'innovation collectivement	72
2.4	Article I - Exploring ways to improve agricultural water management in two Mediterranean irrigated systems	75
2.4.1	Résumé	75
2.4.2	Introduction	78
2.4.3	Methods and study sites	78
2.4.4	Results	80
2.4.5	Conclusions	82

2.1 Introduction du Chapitre 2

Dans le bassin méditerranéen, la durabilité de l'agriculture est menacée par le changement climatique et les pressions anthropiques qui vont exacerber les tensions déjà existantes sur la ressource en eau. L'amélioration des performances de l'agriculture irriguée constitue, dans la diversité de ses formes, l'un des leviers actionnables afin de répondre à cette crise de l'eau. Nous proposons d'explorer les possibilités qu'offrent le développement de nouvelles technologies de masse (électronique embarquée, capteurs à bas coût, protocoles de télécommunication) dans cette recherche de performances. Pour autant, la littérature souligne un décalage fréquent entre les nouvelles technologies pour l'agriculture de précision et la réalité du terrain (Lamb et al., 2008). Par ailleurs, il est important de garder à l'esprit que tout changement de pratiques d'irrigation aura des implications sur le cycle de l'eau à l'échelle locale (Grafton et al., 2018). Aussi, comment adapter la recherche de performances pour l'agriculture irriguée aux enjeux spécifiques d'un territoire? Et comment guider le processus de l'innovation pour parvenir à des outils utiles et utilisés par les usagers de l'eau? Autrement dit, comment façonner l'innovation pour l'adapter aux territoires irrigués?

Dans ce chapitre, nous tenterons de répondre à ces questions par l'étude de deux systèmes irrigués méditerranéens, en France et en Tunisie. Nous verrons en premier lieu comment une analyse systémique de l'agriculture, à travers le prisme de la ressource en eau, peut permettre de guider la recherche de performances grâce à une compréhension fine des contextes agro-hydrologiques. Dans un second temps, nous proposerons une méthode participative pour faire émerger l'innovation au sein des territoires irrigués, et permettre la co-conception de low-tech numériques avec les usagers de l'eau. L'application de cette méthode se traduira par la formation de Water user Fab Labs, imaginés comme des environnements pour cristalliser la recherche locale d'alternatives et fournir un cadre pour le bricolage et l'expérimentation. Finalement, nous étudierons les chemins de l'innovation empruntés par les deux collectifs d'usagers, et discuterons de leurs points communs et différences à la lumière des spécificités des contextes agraires.

Ces travaux, qui s'inscrivent dans la première étape de la stratégie de recherche, ont permis d'intégrer le processus d'innovation au sein de deux socio-hydrosystèmes et d'engager la recherche d'alternatives avec les agriculteurs. Ils constituent ainsi la base pour la suite de la recherche, qui s'appuiera dans un premier temps sur les Water user Fab Labs pour concevoir et expérimenter les nouveaux outils. Les résultats de l'analyse systémique des territoires permettront de discuter des perspectives d'adoption des technologies développées, et contribueront à l'évaluation multi-échelle et multi-critère de leurs impacts sur les performances des systèmes irrigués.

2.2 Appréhender les contextes agraires et les contraintes locales de gestion de l'eau

2.2.1 Etude intégrée de deux territoires irrigués méditerranéens

Nous avons cherché, à travers cette première phase du projet, à appréhender les contextes agraires et à identifier les principales problématiques relatives à la gestion de l'eau agricole de deux territoires irrigués méditerranéens. Afin de répondre à ces objectifs, la méthode du diagnostic agraire a été appliquée aux régions étudiées, dans la plaine de la Crau, France, et la plaine d'El Haouaria, en Tunisie (Fig.2.1). Les données ont été collectées dans le cadre d'une campagne d'enquête entre l'hiver et l'été 2021, incluant des entretiens historiques avec des agriculteurs à la retraite, des entretiens technico-économiques avec les agriculteurs en activité, et des entretiens auprès d'autres catégories d'acteurs impliqués dans la gestion de l'eau du territoire (représentants de collectifs de producteurs, gestionnaires de réseaux hydrauliques, représentants d'associations d'utilisateurs de l'eau, acteurs institutionnels, associations environnementales).

Dans la plaine de la Crau, ce travail a été réalisé dans le cadre du stage de fin d'études d'ingénieur agronome de Pauline Ibgui, et une description détaillée du diagnostic pourra être trouvée dans son mémoire (Ibgui, 2021). Les enquêtes menées dans la plaine d'El Haouaria se sont concentrées sur le périmètre irrigué d'Echraf, représentatif des différents systèmes d'activité et modes d'accès à l'eau sur le territoire. L'objet de cette section est par conséquent de fournir une synthèse des principaux résultats obtenus par l'analyse systémique des deux zones d'étude, qui ont guidé la suite des travaux de recherche.

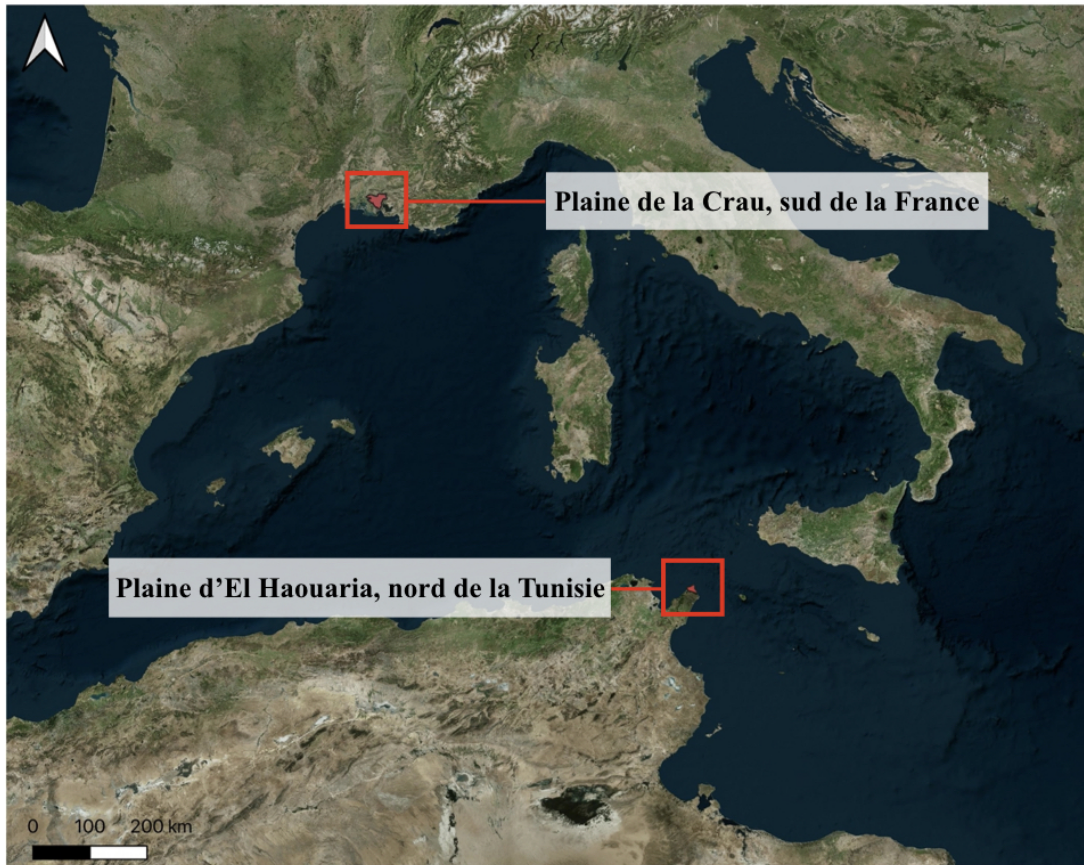


FIGURE 2.1 – Une zone d'étude composée de deux territoires irrigués méditerranéens : la plaine de la Crau (France) et la plaine d'El Haouaria (Tunisie).

2.2.2 La plaine agricole d'El Haouaria : contexte géographique, climatique et socio-économique

Géographie

La plaine d'El Haouaria se situe à la pointe nord du Cap Bon, en Tunisie (Fig.2.2). La péninsule forme la limite nord-est du golfe de Tunis. Le territoire dépend des délégations de Haouaria et Hammam Ghezaz, dans le gouvernorat de Nabeul. La plaine s'étend sur 14350 hectares, et est bordée au nord et au sud par les forêts de Jebel el-Haouaria et Dar Chichou, à l'est et à l'ouest par la mer Méditerranée.

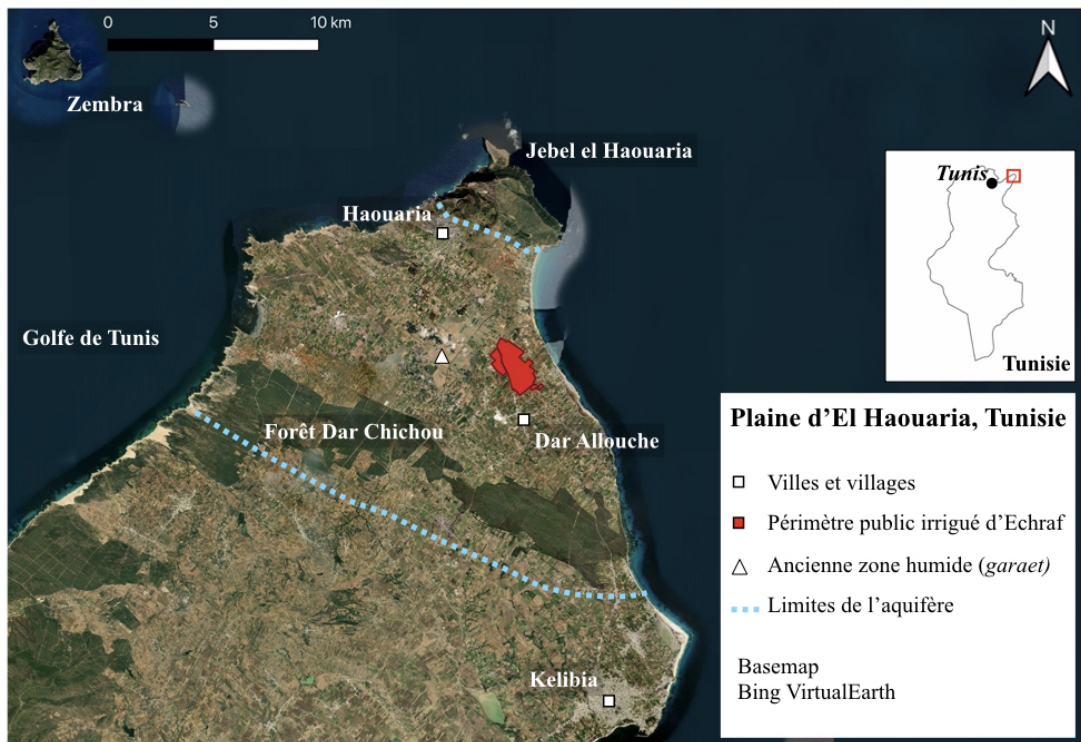


FIGURE 2.2 – Plaine irriguée d’El Haouaria, Tunisie.

Climat

Le climat de la plaine d’El Haouaria étant singulier en raison de sa position géographique particulière, nous préférons utiliser l’historique de données climatiques (1966-2004) obtenues auprès de la station météorologique d’El Haouaria par Ben Hamouda, 2008, plutôt que les données plus récentes fournies par la station de Kelibia, à une quinzaine de kilomètres au sud de la zone d’étude, considérée comme appartenant à un étage climatique différent (Derouiche et al., 2022). Le climat d’El Haouaria est méditerranéen sub-humide. Les températures sont douces, avec une moyenne annuelle de 18.6°C. Les températures maximales sont atteintes entre Juillet et Août et les minimales entre Décembre et Février. La température minimale est toujours supérieure à 7°C, ce qui exclut les gelées. La région est très venteuse (en moyenne 300 jours par an), avec une dominance des vents d’ouest et nord-ouest. La pluviométrie moyenne annuelle mesurée était de 568 mm sur la période 1966 - 2004, ce qui, malgré une forte variabilité intra et inter-annuelle, place la région parmi les zones les plus arrosées de Tunisie

(Derouiche et al., 2022). L'étude du diagramme ombrothermique (Fig.2.3) permet de distinguer une saison sèche de Mars à Octobre marquée par le déficit hydrique, d'une saison plus humide durant laquelle la pluviométrie mensuelle est supérieure à l'évapotranspiration potentielle (ETP). Nous pouvons souligner également l'influence du vent dans les conditions évapotranspirantes, en constatant le décalage entre le pic de température (en Août) et le pic d'ETP (en Juillet).

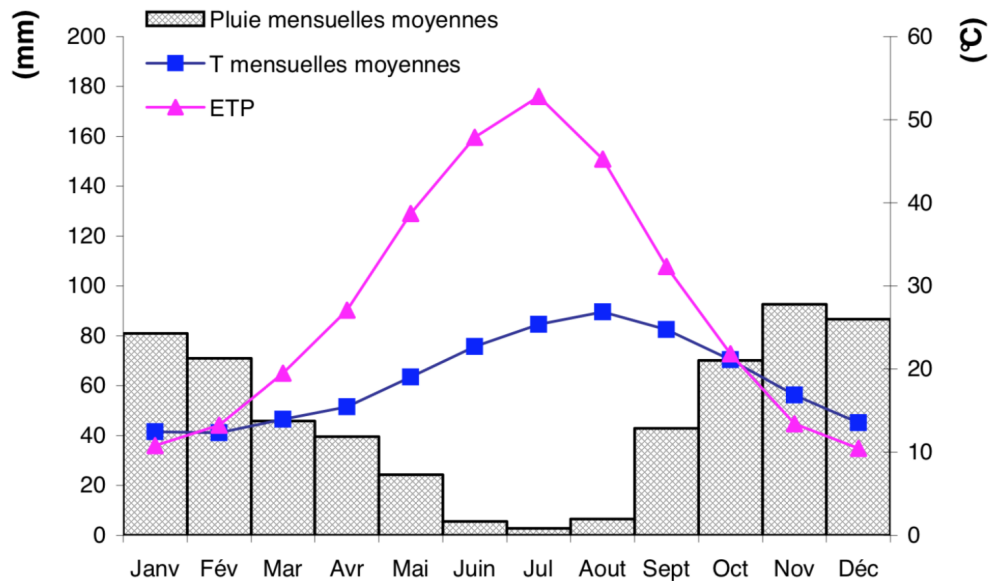


FIGURE 2.3 – Diagramme ombrothermique de la plaine d'El Haouaria, station d'El Haouaria, période 1966-2004. Crédit : Ben Hamouda, 2008.

Environnement socio-économique

L'agriculture est la principale activité économique de la région, et les évolutions du secteur ont modifié durablement l'environnement socio-économique. Reposant autrefois sur l'exploitation de grands domaines (notables grands propriétaires de *Henchir*, fermes coloniales), l'activité a été transformée au début de la seconde moitié du XX^e siècle par le développement des systèmes maraîchers et notamment l'introduction de la culture de la tomate et du piment dans les années 1960. Ces systèmes, exigeants en main d'oeuvre, ont entraîné des mouvements de population, surtout en provenance du *Sahel* tunisien, et la croissance démographique de la zone (Ghazouani et Mekki, 2017). L'organisation de la filière industrielle s'illustre par l'implantation de quatre usines agro-alimentaires dans

la plaine (Socodal, Sticap, Brima et Comocap), spécialisées dans la production et l'export de concentré de tomate et de harissa du Cap Bon, et l'installation de plusieurs pépinières agricoles (Select plant, Agri plant, etc.). Dans une moindre mesure, le secteur touristique se développe timidement, avec une dynamique plutôt tournée vers l'agri-tourisme ou l'écotourisme, qui diffère notablement du tourisme balnéaire s'étant imposé sur le littoral plus au sud (Hammamet, Sousse, etc.).

Moyens de production

La question foncière est complexe dans la région, les actes de propriété ne sont pas toujours enregistrés et les remaniements historiques du foncier ont causé de nombreux flous juridiques qui restent aujourd'hui encore en dehors des cadres de la législation (Ghazouani et Mekki, 2017). La structure foncière se caractérise par un fort morcellement des exploitations agricoles, qui sont majoritairement de petite taille (inférieures à cinq hectares). Au sein de la population d'agriculteurs enquêtés, 80% d'entre eux ne sont pas propriétaires de l'intégralité des terres qu'ils cultivent, qu'il s'agisse d'agriculteurs sans terre, ou cherchant à étendre leur surface cultivée. Les plus grandes propriétés sont le résultat d'investissements fonciers réalisés au cours des dernières décennies, par des particuliers disposant d'un capital non agricole (exploitations de taille moyenne), ou par des sociétés agro-alimentaires (exploitations de grande taille). Les modes de faire valoir suivants ont été observés : i) le fermage, avec un loyer à l'hectare compris entre 900 et 1700 DT selon la qualité des terres (fertilité, pente, accès à l'eau, enclavement, etc.); ii) le métayage, faire valoir le plus courant, qui peut se décliner sous différentes formes. Le métayage au sens propre est pratiqué (50% des revenus nets pour le propriétaire), mais également sous une forme alternative dans laquelle le propriétaire fournit tout ou partie des intrants (eau, engrais, pesticides, semences) et se rémunère donc par rapport au produit brut saisonnier ou annuel. C'est le cas par exemple de certaines sociétés agro-alimentaires, disposant du foncier et de la capacité d'investissement nécessaire aux intrants en début de saison. Le métayage peut également être pratiqué dans le cadre familial,

vis à vis de parents propriétaires ou héritiers co-propriétaires ; iii) le gardiennage, rencontré sur les exploitations arboricoles dont les propriétaires sont la plupart du temps absents (urbains, expatriés). L'exploitation agricole est dans ce cas laissée à la charge d'un ou plusieurs gestionnaire(s), salariés pouvant toucher un pourcentage sur la récolte ou non, et généralement domiciliés sur le domaine.



FIGURE 2.4 – Travail agricole dans la plaine d'El Haouaria : travail du sol par traction animale (en haut) et emploi de main d'oeuvre pour la plantation du piment (en bas), Avril 2021.

Au delà des sociétés agro-alimentaires et du cas particulier des propriétaires absentéistes, les capitaux non issus de l'agriculture sont rares sur le territoire, exception faite de quelques à côtés (retraites et pensions, locations de matériel ou de véhicule). Les emprunts bancaires sont peu pratiqués, l'accès au crédit nécessitant la présentation d'un titre foncier. Pour la majorité des agriculteurs (sauf faire valoir particulier), l'achat des intrants se fait à crédit auprès des fournisseurs (ex. Tanit agricole, ou Socoopec), avec remboursement et intérêts en fin de saison. Le même système est généralement observé dans les périmètres publics irrigués pour le paiement de la redevance sur l'eau après récolte.

Les systèmes maraîchers et arboricoles sont exigeants en main d'oeuvre saisonnière (plantation, opérations culturales, récolte, opérations post-récolte). Dans le cas des petites exploitations extensives, la main d'oeuvre familiale non

rémunérée ou l'entraide avec le voisinage peut suffire à répondre aux pics de travail. Dans la majorité des cas, les agriculteurs font appel à la main d'oeuvre rémunérée, en grande partie féminine. Dans le cadre de travail non spécifique (binage, désherbage, semis, récolte), les hommes sont rémunérés 25 DT par jour, et les femmes 20 DT/j (soit 20% de moins). S'il s'agit d'opérations culturales techniques, ou impliquant un besoin matériel, comme le labour ou la taille des arbres, des tarifs de prestation s'appliquent (100 DT/ha pour le labour tracteur, 50 DT/ha pour un hersage à traction animale, 2.5 DT/arbre pour la taille, etc.). La main d'oeuvre peut être locale, issue des villages alentours, ou bien provenir d'autres régions (Sahel et Afrique subsaharienne principalement) à l'occasion des pics de travail (saison des récoltes maraîchères). Les agriculteurs déplorent souvent une pénurie de main d'oeuvre agricole, liée au développement des industries régionales (pépinières, agro-alimentaire) et au désintérêt des jeunes pour l'agriculture.

Les voies de commercialisation des produits agricoles sont multiples. Les produits maraîchers peuvent être distribués localement dans les différents *souks* de la plaine ou les bourgades alentours (Haouaria, Dar Allouche, Kelibia, etc.), directement par les agriculteurs ou plus souvent par le biais d'intermédiaires qui peuvent visiter les fermes pour acheter "sur pied" la production. Les produits peuvent également être écoulés auprès des entrepôts frigorifiques ("frigos") des industriels (principalement pour la pomme de terre), ou des usines de transformation (tomate, piment, carvi, coriandre, etc.) de la région. Les agrumes sont généralement vendus au marché de gros, à Tunis. Les olives sont dans la grande majorité portées aux moulins (Dar Allouche, Kelibia) pour la production d'huile, qui est davantage consommée localement voire intégralement consommée par le foyer, plutôt que destinée à l'export international comme observé dans les régions plus au sud. Concernant les produits d'élevage, le lait de vache est collecté quotidiennement par camion citerne, et les agneaux sont le plus souvent vendus aux particuliers à l'occasion de la fête de l'*Aïd*.

2.2.3 La plaine de la Crau : contexte géographique, climatique et socio-économique

Géographie

La plaine de la Crau couvre environ 55.000 hectares de littoral méditerranéen français, dans le département des Bouches-du-Rhône. Le territoire est délimité au nord par le massif des Alpilles, à l'ouest par le delta du Rhône, à l'est par l'étang de Berre et les collines de Grans, et au sud par le golfe de Fos et la Méditerranée (Fig.2.5).

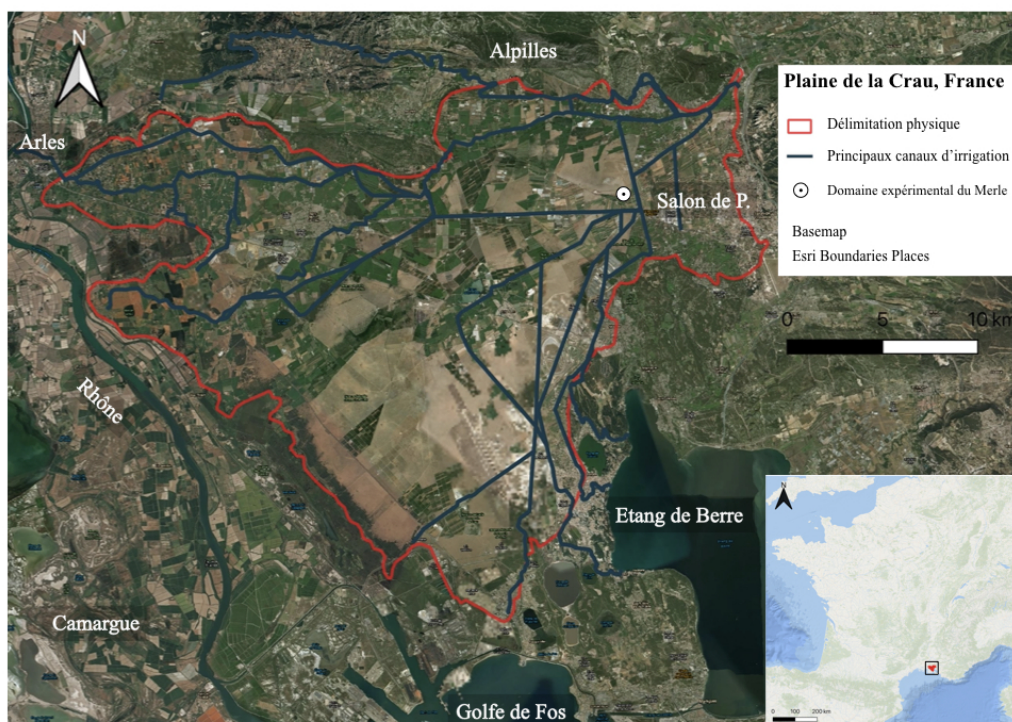


FIGURE 2.5 – Plaine de la Crau, France.

Climat

Plusieurs stations météorologiques couvrent le territoire, mais seulement les stations Météo France et INRAE fournissent l'ensemble des variables suivantes à intervalles journaliers : température, pluviométrie, vent, radiations solaires et pression atmosphérique. D'après la méthode des polygones de Thiessen, des aires

d'influence peuvent être assignées aux différentes stations afin d'extrapoler des valeurs de pluviométrie pondérées pour l'ensemble du territoire (SINERGI, 2020). La pluviométrie moyenne annuelle mesurée à la station de Salon - Domaine du Merle entre 2011 et 2018 (592 mm/an) représente la valeur la plus proche de la pluviométrie moyenne pondérée pour l'ensemble de la Crau à partir des données des différentes stations pour la même période (588 mm/an). La station météorologique du Domaine du Merle a par conséquent été supposée représentative à l'échelle du territoire dans la suite de cette étude.

Le climat de la Crau est méditerranéen (hivers tempérés, étés chauds et secs, pluviométrie irrégulière) et la plaine est particulièrement exposée au *Mistral*, vent dominant nord-ouest. Les moyennes climatiques de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle (ET_o, méthode de Penman-Monteith) moyennes (1993-2017, station du Merle) de la plaine de la Crau sont présentées figure 2.6. Le déficit hydrique climatique est calculé comme la différence entre l'évapotranspiration potentielle et la pluviométrie mensuelles. L'indicateur met en évidence une saison sèche, durant laquelle les précipitations ne satisfont pas la demande en eau potentielle, entre Mars et Septembre, et qui correspond à la saison d'irrigation. Le pic de demande climatique est atteint au mois de Juillet.

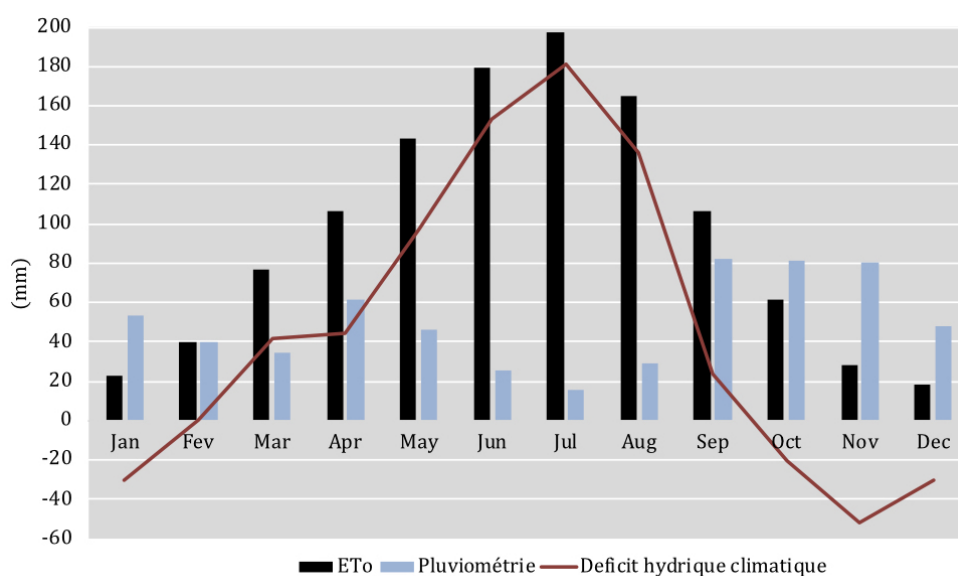


FIGURE 2.6 – Données climatiques moyennes de la plaine de la Crau (Station du Merle, 1993-2017)

Résumé des dynamiques socio-économiques

Terre historiquement inculte et pratiquement inhabitée, la plaine de la Crau est aujourd'hui un territoire densément peuplé (environ 300.000 habitants) qui concentre différents secteurs d'activité. L'activité agricole (hors élevage extensif) est apparue en Crau avec l'arrivée de l'eau, dérivée de la Durance par l'oeuvre d'Adam de Craponne, à partir du *XVI^e* siècle. Au fil des siècles, le développement de nouveaux canaux de distribution d'eau par gravité à travers la plaine s'accompagne d'une mutation du territoire qui, devenant propice à une agriculture diversifiée, se peuple.

En 1955, l'aménagement agro-industriel de la Durance aboutit à la construction d'un grand canal usinier, propriété d'Electricité de France, pour le transport d'eau avec une double destination : la production d'électricité et l'irrigation. C'est également à cette période qu'est construit le barrage de Serre-Ponçon, dans les Hautes-Alpes, qui sécurise l'accès à la ressource en eau en été, et à partir duquel sera alimenté le nouveau canal EDF. Durant cette période des années 1950 - 1970, la superficie irriguée de la plaine de la Crau s'accroît, en lien avec une augmentation des droits d'eau pour l'irrigation gravitaire. Dans le même temps, les progrès de l'irrigation sous pression (forages, équipements) conduisent à l'apparition de nouveaux systèmes de culture : c'est le premier essor de l'arboriculture (fruits à noyaux et à pépins) et l'âge d'or du melon.

La décennie suivante (70-80) est marquée par l'industrialisation et l'urbanisation rapide de la Crau. Le développement du secteur secondaire (zone industrialoportuaire de Fos-sur-Mer, infrastructures logistiques et routières, etc.) mène à l'artificialisation d'une partie des terres agricoles, et surtout des *coussouls*, la Crau sèche, steppique et non irriguée.

A partir de 1980, l'installation d'agriculteurs spécialistes, souvent en provenance d'autres régions françaises, conduit au second essor de l'arboriculture irriguée (fruits à noyaux). Par ailleurs, la mécanisation pour les grandes cultures s'améliore et se généralise, entraînant des gains considérables de productivité du travail pour la culture du foin de Crau. Le foin est exporté vers l'Italie, pour l'élevage bovin, jusqu'à la crise de 1992, où la combinaison de la dévaluation de

la lire italienne (fin du débouché italien) et de la concurrence européenne (inéligibilité du foin de Crau aux subventions de la politique agricole commune (PAC)) met en péril la production fourragère dans la région.

Depuis 1992, la restructuration de la filière foin, via la création d'une AOP (Appellation d'Origine Protégée) et l'association des agriculteurs au sein du Comité du foin de Crau, a permis aux producteurs de foin de retrouver des débouchés et de sortir de la crise. Les dernières réformes de la PAC ont également été favorables aux exploitations comprenant des prairies permanentes, en particulier dans le cas d'une association avec l'élevage ovin extensif. La fin des années 90 et le début des années 2000 sont par ailleurs marquées par la montée en puissance de la protection de l'environnement, avec la création de la réserve naturelle nationale des *coussouls*, qui protège plus de 7000 ha de biodiversité spécifique à la Crau sèche, à laquelle s'ajoute presque 40.000 ha de zone Natura 2000 pour la protection des prairies et des zones humides. Toutes ces évolutions (urbanisation, "sanctuarisation" environnementale, revalorisation de terres agricoles) ont entraîné un blocage relatif du foncier, en nature (usage du sol restrictif) et en termes économiques.

2.2.4 La plaine d'El Haouaria, une durabilité menacée par la sur-exploitation des ressources en eau souterraines

Contexte hydrologique

La ressource en eau de la plaine d'El Haouaria est exclusivement souterraine. De fait, la prédominance de sols sableux associée aux faibles pentes du territoire favorisent l'infiltration des précipitations, tandis que la faiblesse des ruissellements de surface interdit la formation d'un réseau hydrographique permanent en dehors des oueds naissants des pics de précipitations. De nombreuses études ont contribué à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la plaine, qui repose sur deux aquifères : la nappe phréatique, comprise dans une couche sédimentaire quaternaire, et la nappe profonde, logée dans des dépôts marins de l'ère tertiaire (Ben Hamouda, 2008 ; Ghazouani et Mekki, 2017 ; SCET, 2006). Ces deux aquifères sont principalement alimentés depuis une faille du miocène au sud de la plaine, ainsi que par l'infiltration dans les sables dunaires au sud (forêt de Dar Chichou) et au nord (Jebel el Haouaria). Ils sont séparés par une couche semi-perméable argilo-sableuse, qui n'interdit pas les échanges hydrauliques qui peuvent avoir lieu dans les deux sens selon les zones (SCET, 2006).

Une large zone humide (*Garaet*, entre 600 et 3600 ha selon la saison), formée par l'affleurement de la nappe phréatique, s'étendait auparavant au centre de la plaine, entre les localités d'Abène et Haouaria (Fig.2.2). Dans la première moitié du XX^e siècle, la construction d'un réseau de drainage dans le cadre de plans d'aménagements publics, visant à assainir la zone (éradication du paludisme) et à étendre les terres arables, mènera à son assèchement. A l'occasion des entretiens historiques, plusieurs agriculteurs regrettent l'assèchement de ce lac qui fournissait à la plaine une diversité de services écosystémiques (pêche, végétation aquatique, recharge de la nappe phréatique).

Du fait de l'absence de réseau hydrographique de surface, de l'absence de barrages ou retenues collinaires, et de l'absence de transfert depuis d'autres bassins versants du pays (le canal Medjerda-Cap Bon, transportant les eaux du nord-

ouest vers les autres régions, s'arrêtant une quarantaine de kilomètres au sud d'El Haouaria), l'approvisionnement en eau du territoire repose exclusivement sur l'exploitation des deux aquifères pour les usages agricoles, domestiques et industriels. Les prélèvements sont réalisés par pompage (thermique ou électrique) à travers des puits de surface dans la nappe phréatique (7 à 15 m de profondeur) et des forages dans la nappe profonde (au delà de 50 m). Les travaux de Mekki et al., 2017 ont mis en évidence la fragilité de la situation hydrologique de la plaine d'El Haouaria. Si l'augmentation du nombre de puits de surface a ralenti à partir des années 90 (chaque exploitation agricole possédant alors au moins un puits), la course pour l'eau s'est depuis déplacée dans les profondeurs, la proportion de puits de surface illégalement approfondis pour atteindre la nappe profonde étant estimée à 75% (Ghazouani et Mekki, 2017). En conséquence, l'étude des variations piézométriques sur la période 1972-2004 a mis en évidence des dépressions hydrostatiques de l'ordre de la dizaine de mètres pour les deux nappes dans les zones d'exploitation agricole les plus intensives. L'augmentation des prélèvements en eau douce dans des aquifères côtiers accroît par ailleurs le risque d'intrusion saline, et des taux de salinité élevés ont pu être mesurés dans la nappe phréatique (3.2 g.l^{-1} en moyenne) et dans la nappe profonde (2.8 g.l^{-1} en moyenne) (Mekki et al., 2017). Les estimations les plus récentes font état de prélèvements de l'ordre de $60 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$ dans la nappe superficielle, soit environ le double de sa recharge naturelle ($33 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$, SCET, 2006). Selon Mekki et al., 2017, les données officielles du Ministère indiquent des prélèvements dans la nappe profonde d'ordre équivalent à sa recharge naturelle ($5.2 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$), qui ne comprennent vraisemblablement pas les volumes prélevés par un nombre grandissant de puits privés non déclarés atteignant dorénavant la nappe profonde.

Gestion collective de l'eau d'irrigation, l'exemple du PPI d'Echraf

L'irrigation est une pratique ancienne dans la plaine d'El Haouaria, comme le témoigne le nombre de puits anciens creusés manuellement. A partir de la seconde moitié du XX^e siècle, les évolutions techniques des méthodes d'extraction et de distribution des eaux souterraines et la volonté de l'état de développer

l'agriculture irriguée ont conduit au développement de deux périmètres publics irrigués (PPI) dans la plaine d'El Haouaria (Dar Chichou, 500 ha, et Echraf, 180 ha). La suite de nos recherches s'est concentrée sur le périmètre irrigué d'Echraf.

Le PPI d'Echraf se situe à l'est du centre de la plaine d'El Haouaria, entre les localités de Dar Allouche et Echraf (Fig.2.2). Il est traversé par la route régionale C27, à une quinzaine de kilomètres au nord de la ville de Kelibia en direction d'Al Haouaria. Le périmètre irrigué d'Echraf est projeté à la fin des années 1960 comme un périmètre d'irrigation par aspersion alimenté par des forages dans la nappe profonde et distribuant l'eau pratiquement à la parcelle via un maillage de bornes couvrant une surface irrigable d'environ 200 hectares (Fig.2.7). Les travaux d'aménagement, conduits par la sous direction ministérielle de l'hydraulique et de l'équipement rural, sont achevés en 1969. Depuis la création du périmètre, différents modes de gestion du PPI se sont succédés. Ces évolutions témoignent du processus de transfert de la gestion centralisée étatique des PPI vers une gestion déléguée aux associations d'usagers à l'échelle locale. Dans les années 70, la gestion du périmètre est assurée par l'Office d'irrigation, office étatique en charge de l'accompagnement des agriculteurs et de la maintenance des infrastructures hydrauliques du PPI. Durant cette période, l'irrigation par aspersion prend le pas sur l'irrigation traditionnelle gravitaire sous l'impulsion de l'Etat tunisien, qui subventionne les nouveaux équipements.

A partir des années 90, les *Commissariats Régionaux de Développement Agricole* (CRDA) absorbent les offices régionaux de mise en valeur, en devenant chargés des missions suivantes : "réaliser les actions d'équipements hydrauliques, des programmes et projets de mise en valeur hydro-agricole et agricole [...], gérer l'infrastructure hydro-agricole dans les périmètres publics irrigués, assurer sa maintenance et organiser la distribution de l'eau d'irrigation" (article 3, loi n°89-44 du 8 Mars 1989). En parallèle, la volonté de décentralisation et d'implication des usagers dans la gestion de l'eau mène à la création des premières associations d'agriculteurs irrigants. Ainsi en 1992 le PPI d'Echraf gagne en autonomie avec la création d'une *Association d'Interêt Collectif* (AIC), qui deviendra le *Groupement de Développement Agricole* (GDA) dans les années

2000 et jusqu'à nos jours. Les années 90 voient également l'apparition de la technique d'irrigation au goutte à goutte sur le PPI, subventionné par l'Etat et reflet d'une politique de développement agricole davantage tournée vers les économies d'eau. La réalisation du projet ACCBAT (amélioration des techniques d'irrigation pour les cultures maraîchères), mis en oeuvre dans le cadre du programme IEVP CT Bassin Maritime Méditerranée et financé par l'Union Européenne entre 2007 et 2013, a permis d'équiper une vingtaine d'agriculteurs du PPI en systèmes goutte à goutte, fermant ce faisant la parenthèse "irrigation par aspersion" ouverte quarante ans plus tôt.

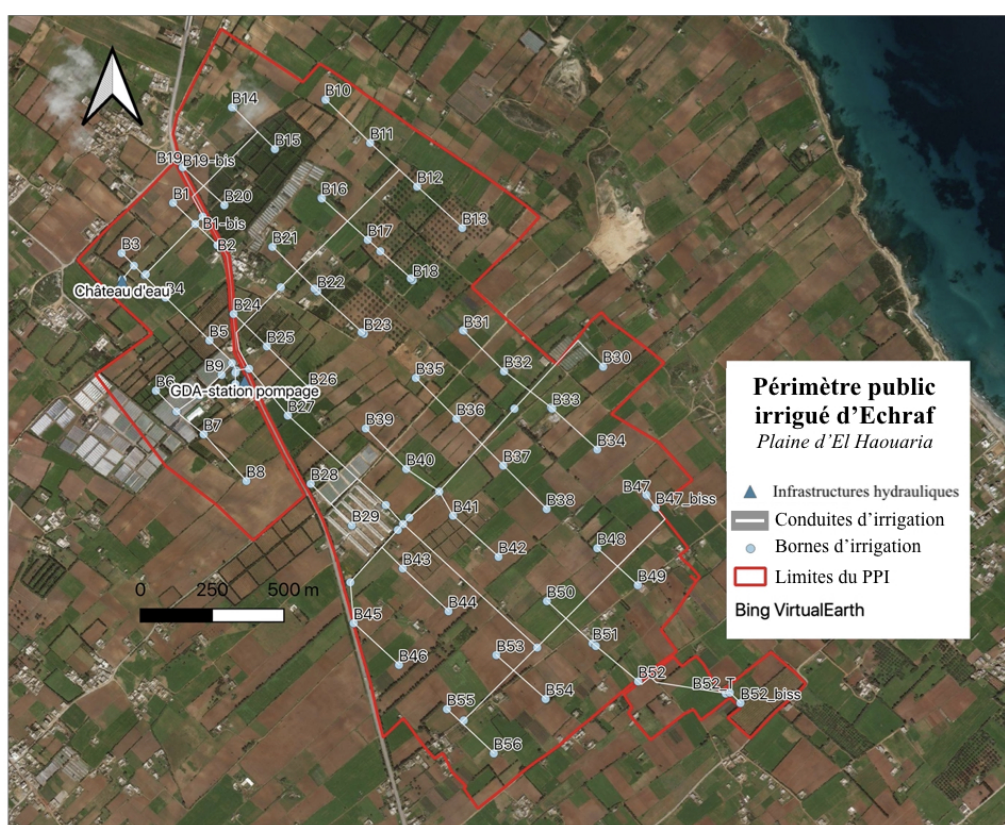


FIGURE 2.7 – Périmètre public irrigué d'Echraf, plaine d'El Haouaria. Données : INRGREF, 2021.

Infrastructures hydrauliques

Sur les sept forages dans la nappe profonde alimentant initialement le PPI d'Echraf, trois seulement sont opérationnels aujourd'hui (l'un abandonné en raison de niveaux de salinité trop élevés, deux autres sont hors service et le dernier sert de secours en cas de problème technique). Les forages desservent un bassin à surface libre d'une capacité de 5000 m^3 , qui fait office de réservoir à l'échelle du PPI (Fig.2.8). L'eau est ensuite mise sous pression par une station de pompage (cinq pompes de débit $250\text{ m}^3.h^{-1}$) avant distribution dans le réseau. Les infrastructures ayant été conçues pour l'alimentation d'un périmètre en irrigation par aspersion, elles apparaissent aujourd'hui sur-dimensionnées pour l'alimentation de systèmes d'irrigation devenus très majoritairement localisés. Ce décalage permet d'expliquer comment, plus de cinquante ans après l'installation des infrastructures et malgré l'usure des infrastructures (perte de rendement des pompes hydrauliques, forages hors service, fuites des conduites en amiante-ciment, etc.), la distribution est toujours assurée.

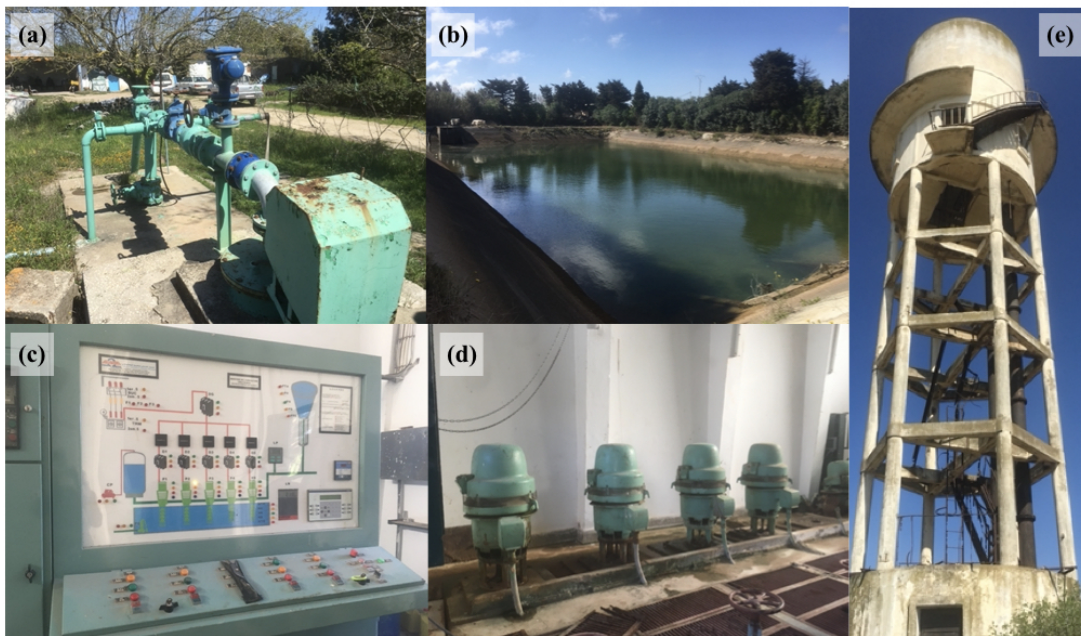


FIGURE 2.8 – Infrastructures hydrauliques du PPI d'Echraf : forage (a), bassin de stockage (b), station de pompage (c, d), et château d'eau (e).

Réseau d'acteurs du périmètre irrigué

Le réseau d'acteurs du PPI est composé des acteurs institutionnels, des gestionnaires de l'association et des usagers de l'eau. Le CRDA, sous la tutelle du Ministère de l'Agriculture, est en charge de la gestion des forages dans la nappe profonde, du réseau de distribution primaire (diamètre des conduites supérieur à 300 mm), du bassin de stockage et de la station de pompage du PPI d'Echraf. Quatre employés permanents sont affectés au périmètre (pompistes et gardien). Le relais local de l'Etat s'exprime sous la forme des *Centres Techniques de Vulgarisation* (CTV), basés à Haouaria et Dar Chichou.

La distribution au sein du PPI est assurée par le GDA d'Echraf. Relativement à son statut d'association de droit privé, il est dirigé par un conseil d'administration et un président, élus lors de l'assemblée générale tous les cinq ans. L'équipe de gestion est complétée par un trésorier, un responsable technique et deux employés salariés (un gestionnaire financier et un aiguadier).

Trois grandes catégories d'usagers peuvent bénéficier de la distribution de l'eau : le secteur agricole, le secteur agro-industriel et le réseau d'adduction d'eau potable. La répartition des volumes alloués par le GDA d'Echraf entre 2010 et 2020 est présentée figure 2.9. En moyenne, 420 milliers de $m^3.an^{-1}$ sont distribués à travers le PPI. La fourniture d'eau à usage domestique n'est plus assurée depuis 2011. Les prélèvements du secteur industriel (usine agro-alimentaire) représentent environ 15 % des volumes distribués en 2020. Le secteur agricole ne distingue pas les volumes prélevés par les agriculteurs des volumes prélevés par les deux pépinières installées sur le PPI. L'association d'usagers de l'eau compte une cinquantaine d'adhérents, auxquels s'ajoutent une dizaine d'adhérents hors PPI (hors des limites de la surface irrigable initiale du PPI), et l'effectif s'est montré relativement stable au cours de la dernière décennie.

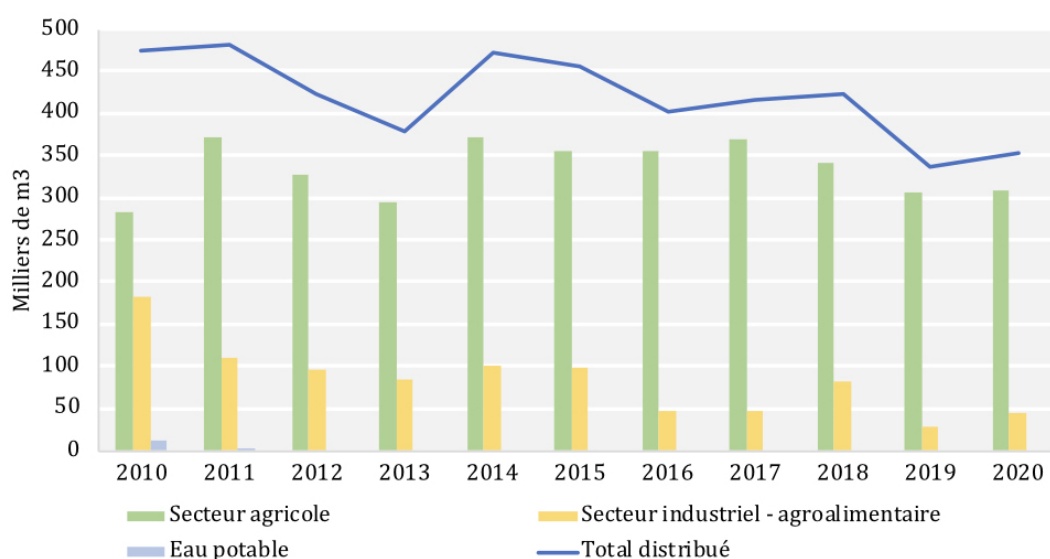


FIGURE 2.9 – Historique et répartition des volumes distribués par le PPI d'Echraf. Données : GDA Echraf, 2021.

Une gestion opérationnelle "à la demande"

Le PPI d'Echraf fonctionne aujourd'hui "à la demande", c'est à dire qu'en théorie l'adduction et la distribution de l'eau s'adaptent aux prélèvements des adhérents en bout de réseau. A l'échelle des exploitations agricoles, l'agriculteur gère la distribution depuis la borne d'irrigation jusqu'à la parcelle. L'eau est délivrée sous pression, entre 1.5 et 3 bars selon la position de la borne, la topographie du réseau, les autres prélèvements ou les fuites éventuelles pouvant faire varier cette pression dans le temps. Le coût du mètre cube d'eau était de 0.145 DT.m^3 pour les saisons d'irrigation 2021 et 2022.

A l'échelle du bloc d'irrigation, une borne peut être partagée par plusieurs usagers (entre un et cinq). Dans la plupart des cas rencontrés, l'organisation d'un tour d'eau informel s'établit entre les usagers, qui s'arrangent entre eux. En cas de conflit, le GDA peut intervenir et imposer un tour d'eau, en fonction des surfaces cultivées et des besoins en eau respectifs des usagers. Toutes les bornes sont équipées de compteurs volumétriques, dont les valeurs sont relevées quotidiennement par l'aiguadier du GDA. En débutant son tour d'eau, l'utilisateur doit contacter l'aiguadier par téléphone pour lui indiquer le volume au compteur. Les volumes mensuels prélevés par usager sont ensuite consignés par le GDA, et

serviront de base au calcul de la redevance en fin de saison.

A l'échelle du périmètre, le CRDA est en charge de l'alimentation du périmètre. A la station de pompage du PPI, les pompistes actionnent les pompes en fonction de la demande en maintenant une pression de 4 *bar* dans le réseau, à partir de la lecture au manomètre de la station. En amont, le remplissage du bassin s'adapte à la demande à partir de l'opération des forages dans la nappe profonde. En cas d'anomalie de niveau d'eau dans le bassin, le pompiste de garde appelle les employés aux forages pour réguler l'alimentation.

2.2.5 La plaine de la Crau, en recherche d'équilibre entre transfert d'eau en surface et recharge souterraine

Contexte hydrologique

La plaine de la Crau est un paléo-delta de la Durance, et son histoire géologique, marquée par une alternance d'épisodes de sédimentation marine et de dépôts alluvionnaires fluviatiles au gré des transgressions de la Méditerranée, a conduit à la formation d'une couche alluvionnaire du quaternaire appelée "cailloutis de Crau". Ce cailloutis est composé de galets roulés et de sables, plus ou moins agglomérés par une matrice calcaire qui peut former des poudingues. C'est au sein de ce cailloutis, dont l'épaisseur varie entre 0 (nappe affleurante) et 40 *m*, qu'est contenue la nappe phréatique de la Crau. Le cailloutis est recouvert par des sols fersiallitiques, plus ou moins caillouteux, et dont l'épaisseur de l'horizon est globalement compris entre 0 (poudingue affleurant) et 80 *cm*. Leur texture diffère selon les zones, de limono-sableuse dans la Crau de Miramas à limoneuse dans la Crau d'Arles.

L'aquifère contenu dans le cailloutis de Crau constitue ainsi une nappe libre, non contrainte par une couche imperméable, qui s'écoule de manière générale selon un plan incliné conforme à la topographie de surface, depuis le nord-est jusqu'au sud-ouest de la plaine (Fig.2.10). Les exutoires de la nappe s'étendent du nord-ouest au sud-ouest du territoire, où ils sont à l'origine de la formation de marais et zones humides. La nappe est en partie alimentée par des flux souterrains

en provenance d'aquifères bordiers au nord-est de la plaine, et par infiltration des eaux de pluie (environ $130 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$).

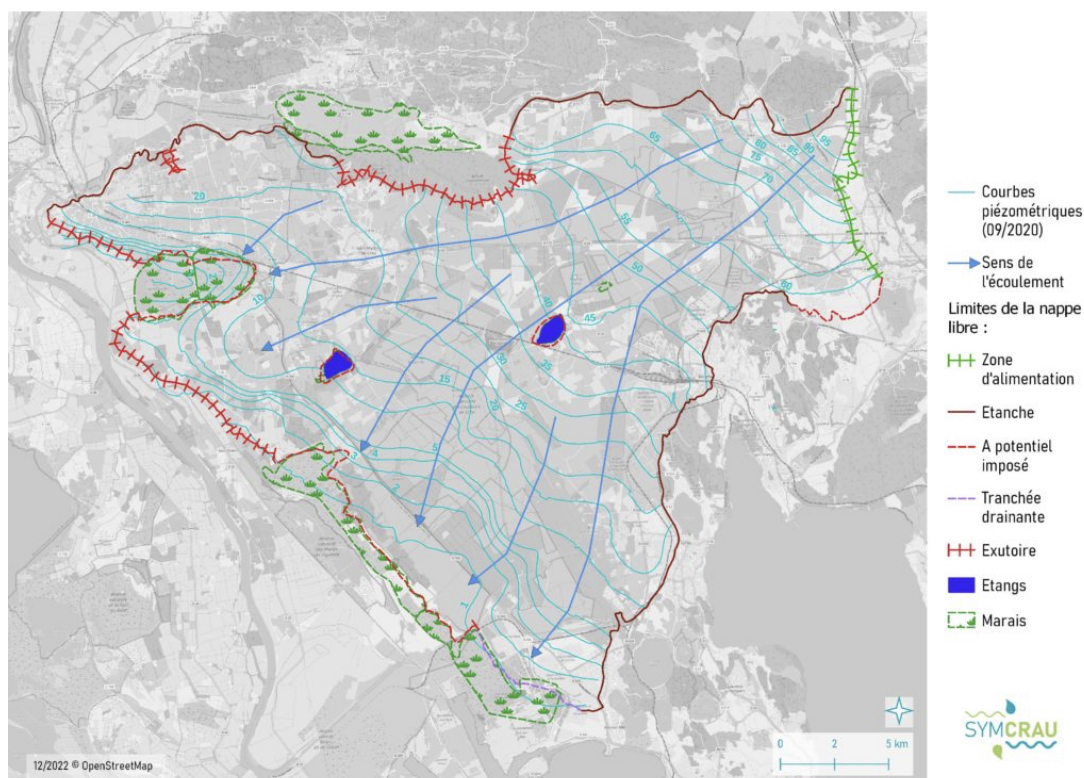


FIGURE 2.10 – Fonctionnement de la nappe phréatique de la Crau. Source : SYMCRAU, 2020.

Le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère de la Crau est fortement dépendant des activités anthropiques (prélèvements et recharge). Le territoire ne dispose pas de cours d'eau naturel, et l'état des eaux souterraines repose sur un fragile équilibre entre les différents usages de l'eau. De fait, l'alimentation en eau de la nappe est majoritairement d'origine artificielle. L'irrigation gravitaire des prairies de foin de Crau, rendue possible par la dérivation des eaux de la Durance, assure la majeure partie de la recharge de l'aquifère, par percolation des volumes appliqués dans la nappe phréatique. Cette pratique induit par conséquent une dynamique saisonnière atypique de la nappe, dont le suivi piézométrique montre un régime de hautes eaux en été (correspondant à la saison d'irrigation de mars à octobre) et un régime de basses eaux en hiver (hors saison d'irrigation). Selon l'étude la plus récente (SINERGI, 2020) réalisée par

le Syndicat mixte de gestion des nappes de la Crau (SYMCRAU), l'irrigation de surface serait ainsi responsable de la recharge artificielle de la nappe phréatique à hauteur de $240 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$, soit environ 65% de sa recharge totale (Fig.2.11).

Par ailleurs, plusieurs secteurs d'activité dépendent de l'exploitation de la nappe phréatique. La plaine de la Crau est densément peuplée, et treize municipalités (environ 300.000 habitants) sont alimentées en eau potable (publique ou privée) à partir de l'extraction des eaux de la nappe, ce qui représente environ 40% des prélèvements. Le secteur industriel (ports, raffineries) contribue à environ 15% des prélèvements. En outre, le développement de l'irrigation sous pression dans la plaine, qui repose sur l'utilisation de forages, a amené une partie du secteur agricole à devenir consommatrice d'eaux souterraines, pour constituer un peu plus de 45% des prélèvements actuels. Différents espaces naturels, étangs et marais, dépendent également de la ressource en eau fournie par l'aquifère de la Crau à ses exutoires. L'ensemble de ces sorties du bilan hydrique du système Crau a été estimé à hauteur de $360 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$

En somme, ces informations rendent compte de l'état d'équilibre dans lequel se trouve l'aquifère de la Crau. La dérivation des eaux de la Durance pour l'irrigation gravitaire des prairies a mené de manière indirecte à la constitution d'une masse d'eau souterraine conséquente, abondante durant la saison sèche. D'autres usagers bénéficient de l'exploitation de cette nappe phréatique (prélèvements agricoles, domestiques, industriels), à un niveau qui demeure inférieur à la recharge. Pour autant, ce constat témoigne également des faibles marges de manoeuvre existantes, et par conséquent de la fragilité de cet équilibre.

Gestion collective de l'eau d'irrigation en Crau

Eaux souterraines pour l'irrigation

La gestion de l'eau souterraine pour l'agriculture se fait de manière individuelle à l'échelle des exploitations, mais est supervisée à l'échelle du territoire par l'Organisme Unique de gestion collective de l'eau (OUGC 13), une structure portée par la chambre d'agriculture. Tout forage agricole dont le prélèvement dans la nappe est supérieur à $1000 \text{ m}^3.\text{an}^{-1}$ doit être déclaré auprès de l'OUGC,

et le suivi des volumes prélevés doit être réalisé. Le suivi de l'état de la nappe est par ailleurs assuré par le syndicat mixte de gestion des nappes de Crau (SYMCRAU), à l'origine d'un contrat de nappe dont l'objectif est de rassembler les acteurs pour gérer la ressource à l'échelle territoriale.

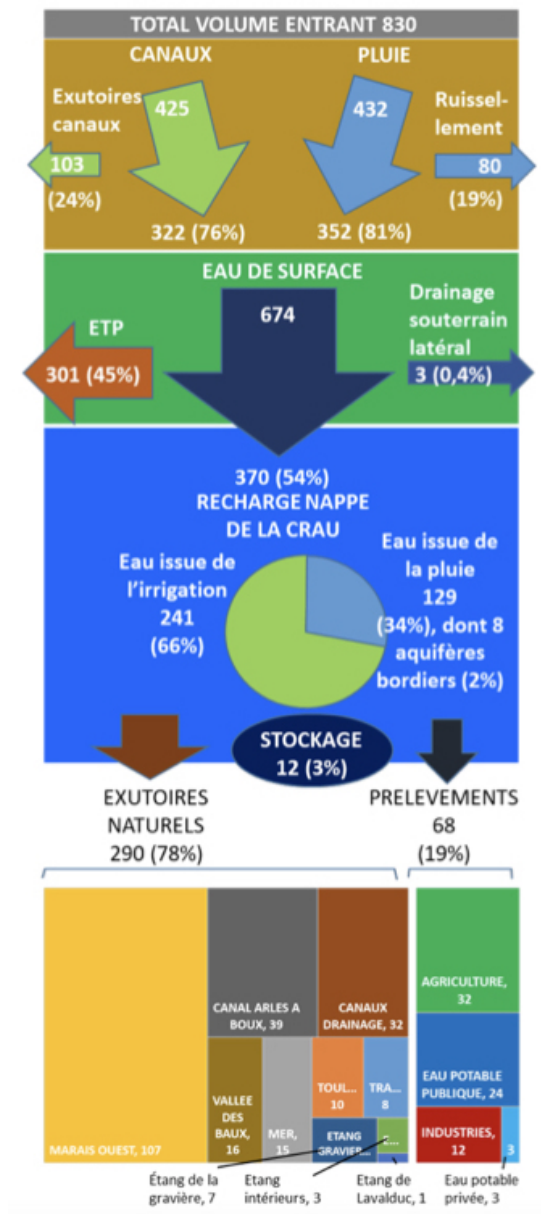


FIGURE 2.11 – Bilan général des flux sur l'hydro système de la Crau. En $Mm^3.an^{-1}$. Crédit : Etude Sinergi, SYMCRAU, 2020.

Eaux de surface : une gestion opérationnelle "au tour d'eau"

Un vaste réseau de canaux d'irrigation à surface libre, développé au cours des cinq derniers siècles, distribue la ressource à travers le territoire. L'alimentation de ces canaux repose sur un transfert inter-bassin des eaux de la Durance, depuis le barrage de Serre-Ponçon dans les Hautes-Alpes via le canal usinier EDF, et le canal de l'Union Boisgelin-Craponne à partir de la prise pour la Crau à Lamanon. La plaine est subdivisée en treize périmètres irrigués (Fig. 2.12, chaque périmètre étant géré localement par une association d'usagers de l'eau - association syndicale autorisée (ASA) ou libre (ASL). A l'échelle du territoire, la gestion de l'eau de surface est régulée par le contrat de canal Crau-Sud Alpilles qui réunit 7.563 membres, pour un réseau comprenant environ 250 km de canaux primaires et 360 km de secondaires et tertiaires.

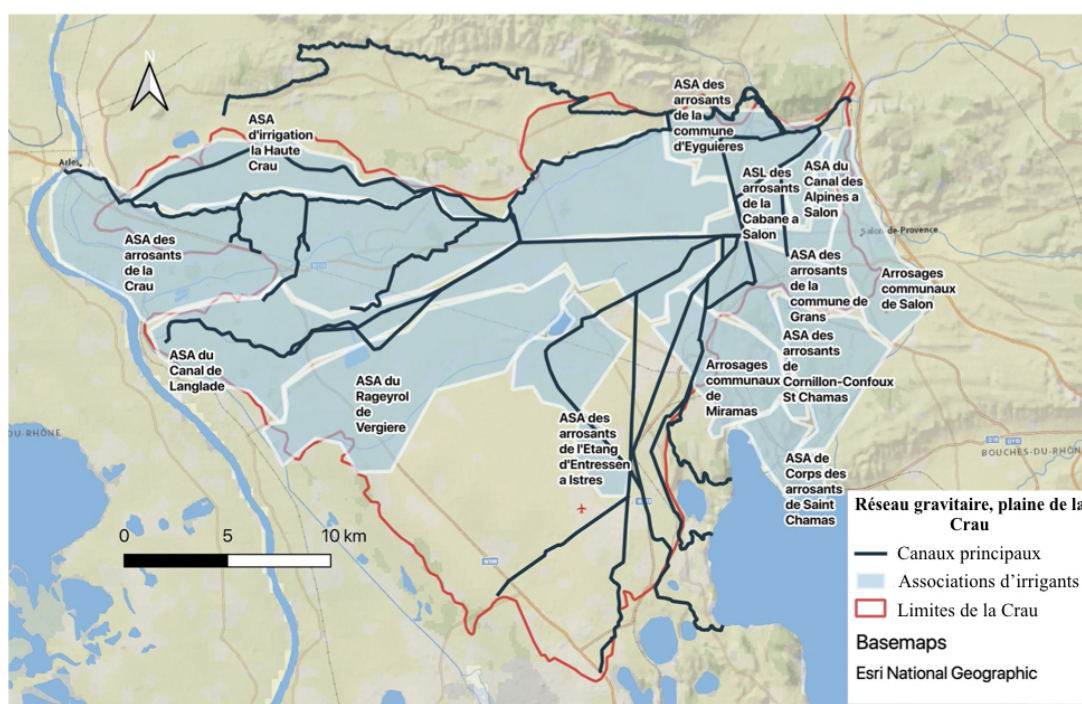


FIGURE 2.12 – Associations d'irrigants dans la plaine de la Crau. Données : Syndicat mixte de gestion des association syndicales du pays d'Arles.

Chaque association dispose d'une dotation (débit alloué en saison d'irrigation) et de droits d'eau historiques (surface irrigable) à l'échelle du périmètre. Les adhérents disposent en théorie d'un débit à l'hectare égal au rapport entre la dotation et le droit d'eau collectif. Ce débit varie entre 1 et $1.5 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ selon

l'historique des ASA. Sauf exception, le droit d'eau est historiquement rattaché à la terre. Dans la pratique, les évolutions du foncier, et en particulier la disparition de certains droits d'eau par artificialisation de terres agricoles, ont redistribué les cartes et il est aujourd'hui possible d'étendre ses droits d'eau par l'achat d'eaux "facultataires" à une ASA, ou de s'arranger avec ses voisins si les débits ne sont pas utilisés. Les adhérents des associations paient une souscription annuelle en fonction de la surface irrigable de leur exploitation. Ce coût varie entre 30 et 200 $euro.ha^{-1}.an^{-1}$ en fonction des ASA selon deux critères : i) la position amont-aval du périmètre par rapport à la prise de Lamanon (plus le périmètre est à l'aval, plus la redevance pour le transport de l'eau est élevée) ; ii) selon que l'ASA assure la gestion du réseau primaire et du secondaire, ou si les agriculteurs maintiennent le secondaire eux mêmes.

La saison d'irrigation s'étend de Mars à Octobre, le reste de l'année est la période de chômage des canaux. Les débits distribués augmentent par paliers progressifs depuis la mise en eau jusqu'au mois de Mai, pour atteindre le plein débit jusqu'en Septembre avant de diminuer à nouveau. Au sein de chaque ASA, des gardes canaux sont en charge de l'opération et de la maintenance du réseau de distribution. La distribution de l'eau s'effectue par "tours d'eau", c'est à dire que l'eau est répartie entre les exploitations agricoles dans le temps selon un calendrier collectif. La fréquence des tours d'eau varie de 7 à 12 jours selon les périmètres, mais la périodicité est souvent de 8.5 ou 9.5 jours afin de répartir la peine des tours d'eau de nuit entre les usagers (un exemple de calendrier d'irrigation au tour d'eau est fourni en Annexe B).

2.2.6 Systèmes de culture irrigués

Plaine d'El Haouaria : le royaume du goutte à goutte

Dualité d'accès à la ressource en eau

L'agriculture irriguée est largement plus pratiquée que l'agriculture pluviale dans la plaine d'El Haouaria. Dans le périmètre d'Echraf, 90% de la surface agricole utilisée (SAU) est irriguée, les cultures fourragères pouvant faire exception. Dans la grande majorité des cas, le système d'irrigation utilisé est le goutte à goutte, pour les systèmes maraîchers comme arboricoles. Deux modes d'accès à la ressource en eau ont été identifiés : par le réseau collectif du groupement de développement agricole (GDA), ou par exploitation de puits privés, individuels ou collectifs. Au sein d'une même exploitation, plusieurs combinaisons sont possibles : eaux du GDA exclusivement (une ou plusieurs bornes de distribution), eaux du puits exclusivement, ou usage combiné d'un puits et des eaux du GDA. Les infrastructures et équipements d'irrigation diffèrent donc selon le mode d'accès à l'eau des exploitations. Quel que soit le mode d'accès à la ressource en eau souterraine, le système d'irrigation au goutte à goutte est privilégié. Deux catégories d'équipement ont été observées : i) les rampes dites "GR", avec goutteurs intégrés, plus chères (0.45 DT.m^{-1}) mais plus durables (durée de vie conseillée de cinq ans) ; ii) les rampes dites "jetables", conduites souples percées, moins chères (0.19 DT.m^{-1}) mais moins durables et plus sensibles au colmatage (durée de vie conseillée d'une saison).

Une représentation cartographique de la répartition parcellaire des systèmes de culture du PPI d'Echraf pour la saison 2021 est donnée en annexe C. Les itinéraires techniques des principaux systèmes de culture sont synthétisés en annexe D.

Systèmes de culture maraîchers

Le maraîchage plein champ représente la pratique la plus répandue dans la zone, avec dans la majorité des cas un double cycle réalisé comprenant une culture d'hiver et une culture d'été. Les cultures d'hiver les plus représentées sont la pomme de terre, la fève, l'ail et l'oignon. Les cultures d'été sont très diversifiées et comprennent la tomate, le piment, l'arachide, le chou, le navet, la carotte et la pastèque. Des condiments sont également cultivés (coriandre, carvi). En toute saison, la salade est souvent semée en prévision du ramadan. Enfin, quelques parcelles de fraise, au cycle annuel, ont été observées. Un temps prédominante, la culture de la tomate a perdu de l'importance ces dernières années au bénéfice des condiments et de la pomme de terre, en raison d'une surproduction nationale, de coûts de production élevés et d'une forte sensibilité aux maladies.



FIGURE 2.13 – Parcelle de pomme de terre, PPI d'Echraf, 2021.

La pomme de terre saison est plantée entre fin Janvier et fin Février, pour être récoltée entre les mois de mai et Juin (cycle de 120 jours). Elle représente à cette saison environ 20% de la SAU du PPI d'Echraf. La variété la plus cultivée est la *Spunta*. Les sols sont préparés par un labour à la charrue à disques en hiver, et la herse prépare le lit de semence avant plantation. La densité de plantation est d'environ 30.000 plants à l'hectare (1.5 m en inter-rang, 0.25 m

dans le rang, en double rangées). Les rangées sont butées environ deux semaines après la plantation (Fig.2.13). Le plan de fertilisation prévoit un engrais de fond ou *starter* à la plantation, parfois précédé d'un épandage de fumier, les autres épisodes de fertilisation s'opérant par fertirrigation via le réseau goutte à goutte. La culture est sensible au mildiou, principalement en début de cycle plus humide, et un fongicide est donc couramment appliqué en systématique jusqu'au mois d'avril. L'irrigation est réalisée du mois de Mars jusqu'à la récolte, avec une fréquence moyenne de trois jours, variable selon les exploitations. Les résultats d'enquête ont souligné une grande variabilité entre les exploitations concernant les rendements (entre 25 et 50 $T.ha^{-1}$), ainsi que dans les volumes d'irrigation appliqués (entre 4000 et 7500 $m^3.ha^{-1}$). Une partie de la récolte peut être conservée pour les semences de la pomme de terre d'arrière saison, de novembre à février.

Systèmes de culture arboricoles

Deux systèmes arboricoles principaux ont été observés dans la zone : l'agrumiculture et l'oléiculture (Fig.2.14).

La culture d'agrumes est une spécialité du Cap Bon, elle représente environ 10% des surfaces cultivées du PPI d'Echraf. Les principales productions sont celles de l'orange, du citron, de la mandarine et de la clémentine, auxquelles s'ajoutent quelques exceptions (pamplemousse, cédrat...). Les variétés cultivées sont diverses, mais les itinéraires techniques plutôt similaires. La densité de plantation avoisine les 420 arbres par hectare. Les systèmes agrumicoles sont exigeants en intrants (pesticides, engrais, eau) et en main d'oeuvre (taille, récolte, traitements), et nécessitent un investissement initial conséquent à la plantation. Le système d'irrigation privilégié est le goutte à goutte "GR", en double rampe, en "queue de vache" (dérivation circulaire autour du pied) voire enterré. Le débit d'équipement par arbre varie en fonction des dimensionnements, entre 40 et 60 $l.h^{-1}$. La saison d'irrigation s'étend en général de Mars à Septembre, et les volumes d'irrigation appliqués peuvent varier selon les variétés, l'âge des arbres et les pratiques entre 3000 et 6000 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$.

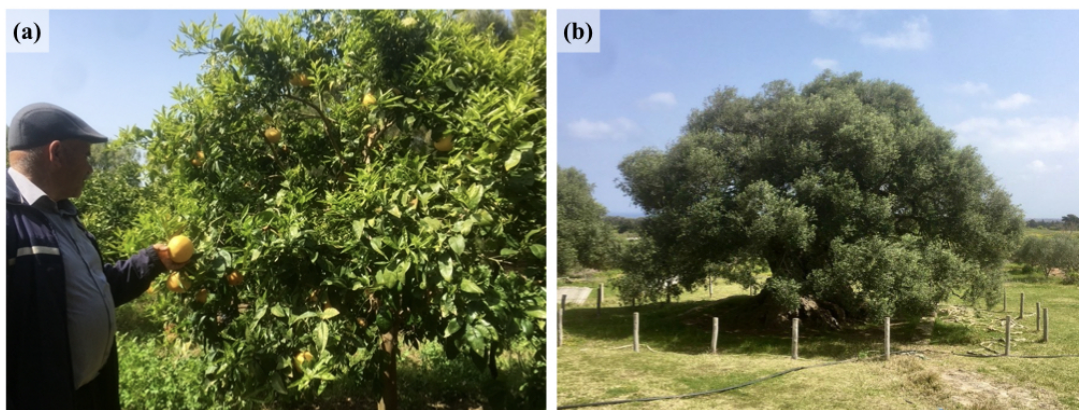


FIGURE 2.14 – Arboriculture dans la plaine d'El Haouaria : a) citronnier quatre saisons, b) olivier millénaire d'Echraf, 2021.

La culture de l'olivier peut être pratiquée de manière traditionnelle, en système extensif (espacements de 18 m par 18 m avec cultures maraîchères intercalaires), ou bien en intensif monoculture (espacements de 7 m par 7 m, voire 6 m par 4 m). Dans les systèmes extensifs, l'olivier n'est pas irrigué autrement que par les excédents d'irrigation des cultures intercalaires. Dans les systèmes intensifs, l'olivier peut être irrigué durant les mois les plus secs (de Juin à Août) et une dose d'irrigation moyenne de $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ a été estimée à partir des résultats d'enquête. Les rendements obtenus en intensif sont plus réguliers et en moyenne deux à trois fois supérieurs (entre 10 et $12 \text{ T} \cdot \text{ha}^{-1}$) aux rendements obtenus en extensif.

Plaine de la Crau : de l'herbe inondée à profusion et des fruits sous perfusion

Dans la plaine de la Crau, la surface agricole utilisée est d'environ 25.000 ha, soit 50% du territoire. Les surfaces irriguées représentent 18.000 ha, soit 70% de la SAU (d'après les données d'occupation des sols 2016, Fig.2.15). Les principaux systèmes de culture irrigués du territoire sont les suivants : le foin de Crau, les systèmes arboricoles et les systèmes maraîchers.

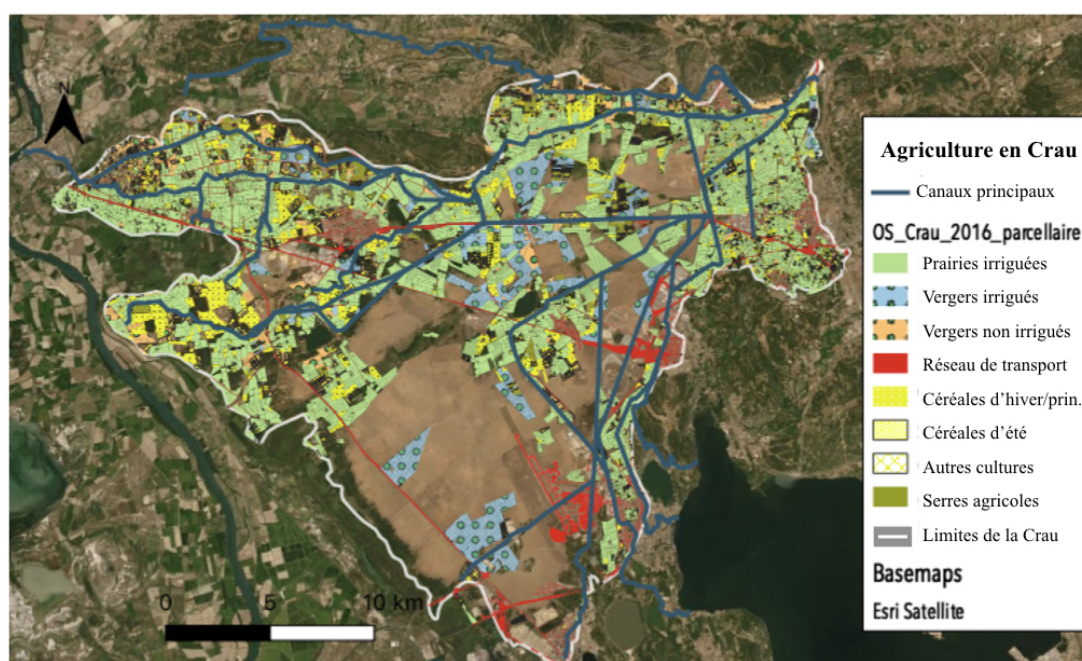


FIGURE 2.15 – Répartition des systèmes de culture dans la plaine de la Crau. Données : CES OSO, 2016.

Le foin de Crau, système de culture majoritaire

Le secteur du foin de Crau représente 14.000 ha de prairies irriguées par les eaux de la Durance à travers un réseau de canaux et filioles de plus de 2000 km. Il s'agit de la culture traditionnelle et majoritaire de la plaine, qui rassemble 280 producteurs pour une production annuelle totale estimée à 120.000 T, en dépit d'une tendance à la réduction des surfaces cultivées en raison de la transition vers d'autres systèmes de culture et de la pression du foncier liée à l'urbanisation. Le foin de Crau bénéficie d'une appellation d'origine contrôlée qui en fait le

seul fourrage labellisé et contribue à son succès en France et à l'international. La culture du foin de Crau AOP doit répondre à un cahier des charges défini par le Comité du foin de Crau (association de producteurs), dont les principales caractéristiques peuvent se résumer ainsi : i) la composition floristique est contrôlée pour maintenir un équilibre précis entre les graminées et les légumineuses, à l'origine de sa valeur nutritionnelle ; ii) l'irrigation des prairies se fait par submersion (irrigation à la planche), entre Mars et Octobre (Fig.2.16). La fréquence des irrigations est définie par les tours d'eau (entre sept et douze jours), pour un total d'environ quinze épisodes d'irrigation par saison. Ces pratiques se traduisent par des volumes d'eau appliqués variables et conséquents, pouvant atteindre 15.000 à $25.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$; iii) la fertilisation azotée minérale est limitée à 40 unités par hectare et par an, et les fumures organiques lui sont préférées ; iv) la production de foin est basée sur trois récoltes, toutes les huit semaines à partir du démarrage de la saison d'irrigation. La quatrième et dernière fauche est souvent allouée au pâturage ovin. Le rendement maximal est fixé à $11 \text{ T} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$.

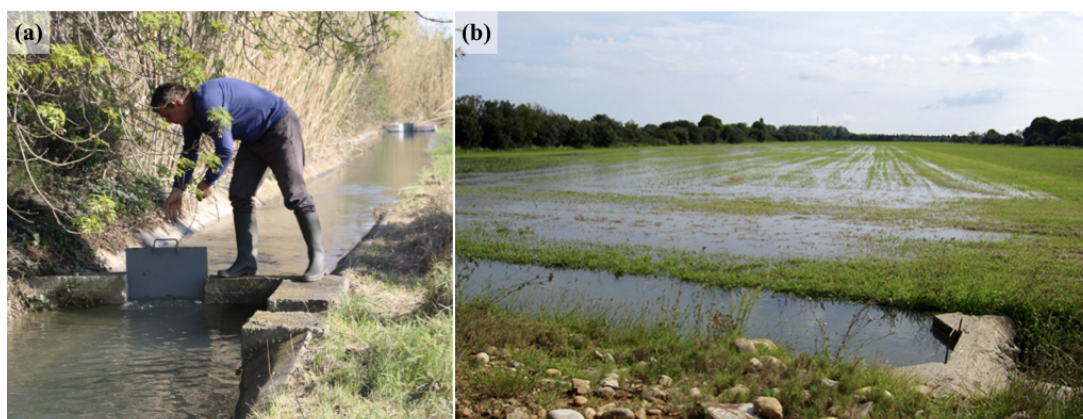


FIGURE 2.16 – Irrigation à la planche du foin de Crau : opération d'une martelière (a) et submersion du champ (b).

Systèmes de culture arboricoles

Les systèmes arboricoles représentent la seconde production de la plaine avec une surface en vergers de 3200 ha . La production est diversifiée : pêches, nectarines et abricot surtout, mais aussi cerises, amandes et olives. L'irrigation traditionnelle gravitaire à la raie a été abandonnée au profit de systèmes d'irrigation sous pression modernes et localisés (goutte



FIGURE 2.17 – Arboriculture dans la plaine de la Crau : a) plantation de nouveau verger, b) verger de pêchers en production. Crédit : Pauline Ibgui, 2021.

à goutte et micro-aspiration). Dans ce cas, l'eau est prélevée dans la nappe de la Crau par l'intermédiaire de forages individuels. Les résultats d'enquête ont permis d'estimer des volumes d'irrigation appliqués pour la culture des pêchers compris entre 6000 et 7000 $m^3.ha.an^{-1}$, et d'environ 1700 $m^3.ha.an^{-1}$ pour l'irrigation des oliviers. Les surfaces arboricoles ont tendance à augmenter ces dernières années (amande notamment), souvent au détriment des prairies.

Systèmes de culture maraîchers

Les systèmes maraîchers représentent 800 *ha* sur le territoire. Ils sont majoritairement conduits sous abris, en serre, ou sous tunnels, et environ 15% des exploitations pratiquent la culture hors-sol. Les cultures principales sont les suivantes : tomate, courgette, aubergine, concombre, poivron, fraise et melon. Dans l'intégralité des cas rencontrés, l'irrigation sous pression et localisée était pratiquée. La reconstitution des volumes d'irrigation appliqués à partir des enquêtes suggère des consommations en eau annuelles plus élevées pour les systèmes hors sols que pour les systèmes pleine terre, en raison de la multiplication des cycles cultureux (par exemple deux cycles de courgette par an hors sol contre un cycle annuel en pleine terre).

2.2.7 Systèmes de production

L'analyse systémique de l'agriculture dans les deux sites d'étude a permis de donner une représentation des principaux systèmes de production au sein des territoires irrigués (Table 2.1). Nous donnons ici une synthèse comparative qui, à défaut d'embrasser la grande diversité des systèmes observés, permet d'illustrer le raisonnement qui a guidé la suite des travaux de recherche.

Plaine d'El Haouaria : de la ferme familiale à la grande exploitation patronale

Dans la plaine d'El Haouaria, les enquêtes réalisées sur le périmètre irrigué d'Echraf ont permis de proposer une typologie reposant sur quatre systèmes de production principaux :

Les **maraîchers spécialistes** représentent les exploitations pratiquant la culture maraîchère de rente en fonction des opportunités du marché (fraise, tomate, pomme de terre, oignon, piment) de manière relativement intensive en intrants (engrais, pesticides, eau). Le recours à la main d'oeuvre saisonnière est important à l'occasion des pics de travail (semis, récolte) et le niveau de mécanisation est plus élevé que dans les exploitations familiales.

Les **arboriculteurs absentéistes** cultivent principalement des agrumes, mais aussi l'olive ou la grenade. Le propriétaire exerce une activité non agricole (souvent cadres et professions intellectuelles supérieures) en ville ou à la capitale, et recourt à une main d'oeuvre salariée permanente pour la gestion courante de l'exploitation.

Les **petites exploitations familiales** pratiquent la polyculture-élevage sur de petites surfaces. Les actifs sont exclusivement familiaux, mais l'entraide entre agriculteurs est courante au moment de la récolte. La production est en partie vivrière, les intrants et le niveau de mécanisation peuvent être limités par la capacité d'investissement du foyer. Le revenu annuel net par actif est globalement plus faible. Ce système de production représente, avec les maraîchers spécialistes, la plus grande partie des exploitations.

Les **grandes exploitations patronales** se distinguent par leurs surfaces plus importantes et par leur mode de gestion exclusivement salarié. Ces systèmes s'appuient sur des capitaux importants (grandes familles régionales) qui leur donnent accès au foncier, à un haut niveau de mécanisation, à une forte main d'oeuvre saisonnière et dans certains cas aux infrastructures de stockage, de transformation ou de distribution des produits. Le maraîchage intensif et parfois l'élevage ovin et bovin sont pratiqués. Ce type d'exploitation est plutôt rare dans la région, mais n'est pas négligeable au vu des surfaces considérées.

Plaine de la Crau : cohabitation entre systèmes extensifs et intensifs

Dans la plaine de la Crau, nous proposons une typologie simplifiée d'après nos travaux (Ibgui, 2021) qui peut se résumer ainsi :

Le système des **spécialistes de la production fourragère** inclut toutes les exploitations spécialisées dans la culture du foin de Crau. C'est, de loin, le système de production majoritaire de la plaine de la Crau, avec le **système monoculture-élevage extensif**, qui associe la production de fourrage avec l'élevage ovin ou, dans une moindre mesure, l'élevage bovin. Ils reposent sur une main d'oeuvre qui comporte peu d'actifs à l'hectare, souvent composée de permanents familiaux et/ou de salariés permanents, et de quelques salariés saisonniers (aiguadier, berger) dans les plus grands domaines. Ces deux systèmes pratiquent l'irrigation à la planche des prairies à partir du réseau de distribution collectif d'eau de surface.

Les herbassiers, éleveurs sans terres de plaine et sans autonomie fourragère, sont devenus rares et représentent aujourd'hui un système un peu à la marge.

Les **arboriculteurs indépendants** cultivent de grandes surfaces de vergers de fruits à noyaux. Ce système s'appuie sur une main d'oeuvre saisonnière conséquente pour la taille, la récolte, le tri et le conditionnement des fruits, qui sont vendus en gros pour l'export ou les centrales d'achat. L'irrigation est pratiquée au goutte à goutte ou en micro-aspersion, à partir de forages individuels dans la nappe phréatique, au même titre que les systèmes **maraichers intensifs et diversifiés**.

Ce dernier se différencie du maraîchage intensif par la diversification de ses cultures, l'étalement des pics de travail limitant la nécessité d'une main d'oeuvre saisonnière, et les débouchés des produits (circuits courts, label biologique).

Conclusion : des systèmes de production "clés de voûte"

La réalisation de cette première étape de la stratégie de recherche nous a permis d'appréhender le fonctionnement de deux contextes agraires méditerranéens à travers le prisme de l'eau.

Dans la plaine de la Crau, l'irrigation de surface des prairies constitue un maillon essentiel du cycle de l'eau territorial. L'analyse a souligné la fragilité des systèmes de production reposant sur l'irrigation gravitaire, contraintes en main d'oeuvre, menacées par la pression foncière et aux marges de manoeuvre économiques limitées.

Dans la plaine d'El Haouaria, l'introduction de nouveaux systèmes d'irrigation localisée n'a pas réussi à désamorcer la situation de sur-exploitation de la ressource en eau souterraine. L'analyse a mis en évidence l'importance des prélèvements pour l'irrigation des cultures maraîchères en particulier. En outre, le travail d'enquête a fait ressortir une grande variabilité des pratiques et performances de l'irrigation d'une exploitation à l'autre, notamment parmi les petites exploitations familiales.

Aussi nous chercherons dans la suite de ce travail à imaginer, au sein de chaque territoire et à la lumière des contextes agro-hydrologiques, des moyens d'accompagner ces systèmes de production particulièrement vulnérables dans leur pratique de l'irrigation.

TABLE 2.1 – Synthèse comparative des principaux systèmes de production des territoires irrigués de la Crau et d'El Haouaria.

Système agraire	Système de production	Systèmes de culture et d'élevage	SAU (ha)	Surface agricole irriguée (%)	Main d'oeuvre principale	Résultats économiques	Ressource et accès à l'eau
Echraf - El Haouaria	Maraîchers spécialistes	Monoculture maraîchère plein champ	3-10	100	1-2 actifs permanents salariés saisonniers	Moyens	Eau souterraine réseau collectif et individuel
Echraf - El Haouaria	Arboriculteurs absentéistes	Agrumes, oliviers intensifs	5-10	100	1-2 salariés permanents salariés saisonniers	Moyens Revenus non agricoles	Eau souterraine réseau collectif et individuel
Echraf - El Haouaria	Petites exploitations familiales	Polyculture-élevage	1-4	60-100	1-2 actifs familiaux	Faibles	Eau souterraine principalement réseau collectif
Echraf - El Haouaria	Grandes exploitations patronales	Maraîchage, élevage	>60	75-100	2-3 salariés permanents salariés saisonniers	Elevés	Eau souterraine réseau collectif et individuel
Plaine de la Crau	Spécialistes fourragers	Foin de Crau	30-200	100	1-2 actifs familiaux ou 1-2 salariés permanents	Moyens à élevés	Eau de surface Réseau collectif gravitaire
Plaine de la Crau	Monoculture-élevage	Foin de Crau, élevage ovin ou bovin	50-1000	10-80	1-2 actifs familiaux et/ou 1-2 salariés permanents 1-2 salariés saisonniers	Faibles à moyens	Eau de surface Réseau collectif gravitaire
Plaine de la Crau	Herbassiers	Elevage ovin	-	0	1 actif familial	Faibles	-
Plaine de la Crau	Arboriculteurs indépendants	Arbres fruitiers à noyaux	90-200	100	2 actifs familiaux et 30-60 salariés saisonniers	Moyens à élevés	Eau souterraine Forages individuels
Plaine de la Crau	Maraîchers intensifs	Monoculture maraîchère, hors sol ou sous abri	2-5	100	1-2 actifs familiaux et 10-30 salariés saisonniers	Moyens à élevés	Eau souterraine Forages individuels
Plaine de la Crau	Maraîchers diversifiés	Polyculture maraîchère, plein champ ou sous abri	1-4	100	1-2 actifs familiaux	Moyens	Eau souterraine Forages individuels

2.3 Water User Fab Labs : une approche participative pour concevoir l'innovation

Paul Vandôme¹, CrysteLe Leauthaud¹, Simon Moinard², Insaf Mekki³, Abdelaziz Zairi³, et Gilles Belaud¹.

[1] G-EAU, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, IRD, INRAE, Institut Agro, Univ. Montpellier, 361 rue J.F Breton, 34196 Montpellier, France.

[2] ITAP, Univ Montpellier, INRAE, Institut Agro, 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France.

[3] Institut National de Recherches en Genie Rural Eaux et Forets (INRGREF), Univ. Carthage LR16INRAT05 L.STA, Tunis, Tunisie.

Ces travaux ont été présentés à l'assemblée générale de l'Union Européenne des Géosciences (EGU 2023) dans le cadre de la session "*The MacGyver session for innovative and/or self made tools to observe the geosphere, including frontiers in river flow monitoring*" : doi.org/10.5194/egusphere-egu23-12622.

2.3.1 Cristalliser la recherche d'alternatives

A ce stade du projet, nous avons cherché à mettre en place une méthode qui permette de concevoir une innovation adaptée aux contextes agraires. Les travaux d'enquête nous ont apporté un bagage utile pour la compréhension des relations entre les agricultures irriguées et les cycles de l'eau locaux. Nous avons identifié des systèmes de production "clés de voûte", vulnérables et dont la mutation aurait des répercussions sur différentes dimensions territoriales. Les enquêtes avec les agriculteurs, à travers des questions pratiques sur la gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation (Annexe A), nous ont également donné une première idée des contraintes dans la gestion opérationnelle de l'irrigation auxquelles peuvent être confrontés ces systèmes. Pour autant, plusieurs questions demeurent : quels sont les besoins et attentes des agriculteurs en terme de gestion de l'eau ? Ces besoins sont-ils communs ou particuliers ? Est-ce que des solutions ont déjà été essayées ? Comment éviter le décalage entre des solutions développées en laboratoire et la

réalité de terrain ? Comment évaluer l'adéquation de la solution proposée avec les pratiques des usagers ? Autrement dit, **comment s'assurer que l'innovation soit utile et utilisée au sein des territoires irrigués ?**

Dans l'optique de répondre à ces questions, nous avons expérimenté une méthode de conception participative de l'innovation à travers la mise en place de **Water user Fab Labs** (Fig.2.18). Les Water user Fab Labs (WFL) sont imaginés comme une application à l'agriculture irriguée du concept des Fab Labs, apparu au MIT (Massachusetts Institute of Technology) sous l'impulsion de Neil Gershenfeld à la fin des années 1990. Il s'agit en substance de "laboratoires de fabrication", espaces collectifs pour le bricolage numérique. Nous proposons d'en détourner légèrement l'usage afin d'en faire un cadre qui permette de **crystalliser la recherche d'alternatives** pour les usagers de l'eau au sein d'un territoire rural. A travers les WFL, une méthode cyclique reposant sur l'implication des agriculteurs à différentes étapes du processus d'innovation a été éprouvée depuis le début d'année 2022 au sein des plaines de la Crau et d'El Haouaria.

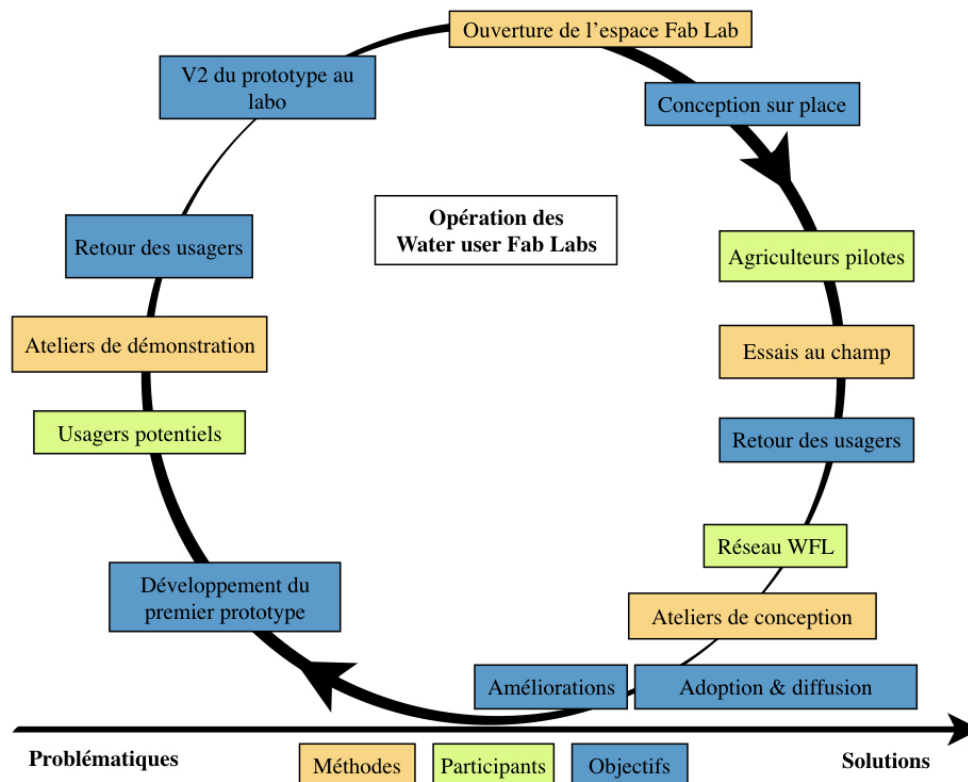


FIGURE 2.18 – Fonctionnement des Water user Fab Labs.

2.3.2 Les WFL en pratique : penser et expérimenter l'innovation collectivement

Dans la pratique, les Water user Fab Labs ont pris des formes différentes selon le territoire dans lequel ils se sont inscrits. Dans la plaine d'El Haouaria, la création du WFL s'est appuyée sur l'association d'usagers de l'eau du périmètre irrigué d'Echraf. Le GDA est apparu comme le meilleur cadre pour accueillir le nouvel atelier collectif, dans la mesure où : i) le lieu était connu de tous les agriculteurs ; ii) les locaux sont accessibles, au bord de la route régionale ; iii) une pièce pouvant servir d'atelier a été mise à disposition par le GDA ; iv) le WFL pouvait s'appuyer sur le réseau d'agriculteurs de l'association et gagner en visibilité. Dans la plaine de la Crau, le WFL s'est incarné au Domaine du Merle, domaine expérimental et centre de formation de l'Institut Agro Montpellier, qui répondait aux qualités suivantes : i) le lieu était connu de tous ; ii) le lieu était accessible à la croisée des routes principales de la Crau ; iii) les infrastructures permettaient d'accueillir du monde dans de bonnes conditions ; iv) le WFL pouvait s'appuyer sur l'expérience des responsables du Domaine et leur réseau d'acteurs et enfin v) la pratique de l'irrigation gravitaire du foin de Crau sur l'exploitation offrait la possibilité d'expérimenter les prototypes et d'en faire la démonstration. Sur les deux territoires, des groupes d'agriculteurs, rencontrés dans le cadre de la campagne d'enquête ou identifiés comme potentiels usagers correspondant aux systèmes de production prioritaires préalablement déterminés, ont été constitués afin de composer la base du réseau des WFLs.

A partir des résultats d'enquête, nous avons proposé un premier jeu de prototypes aux agriculteurs rassemblés dans le cadre de *focus group*. Dans un premier temps, une analyse participative a permis de revenir sur les résultats d'enquête (Fig.2.19), dans une forme similaire à la méthode de l'arbre à solutions (Chevalier et Buckles, 2013). Dans un second temps, les agriculteurs ont été invités à essayer les prototypes à travers des ateliers de démonstration (Fig.2.20), et donner leur avis sur les propositions (pertinence, lisibilité, préférences d'accès à la donnée, etc.).

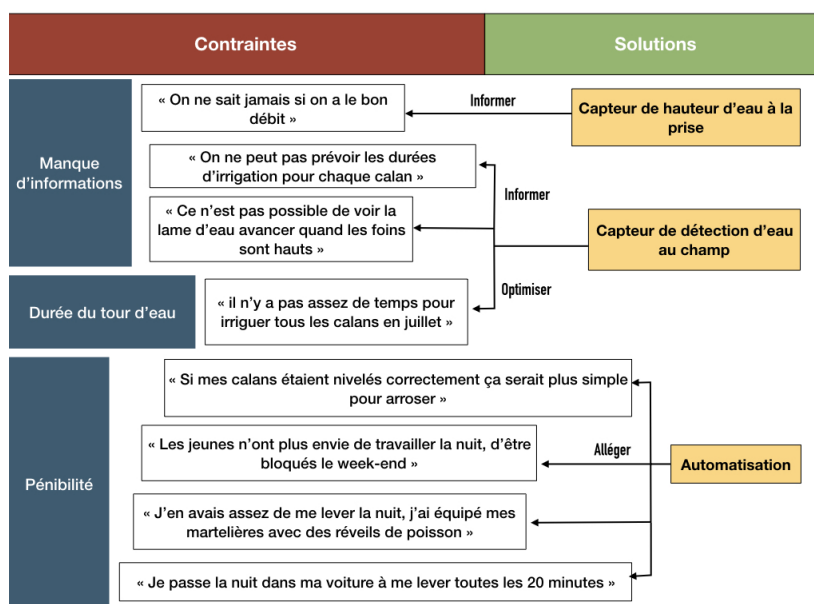


FIGURE 2.19 – Support d'analyse participative à partir des résultats d'enquête, exemple du WFL de la Crau, 2021.

La combinaison des résultats d'enquête et de ces échanges a conduit à la réalisation de cahiers des charges qui guideront la conception des prochains prototypes. Finalement, nous avons proposé aux agriculteurs d'expérimenter les prototypes améliorés en conditions réelles au cours de la saison d'irrigation 2022. Dans le cadre du WFL d'Echraf, trois agriculteurs pilotes se sont portés volontaires pour participer aux essais d'un capteur d'humidité du sol pour la gestion de l'irrigation de la pomme de terre. Dans le cadre du WFL de la Crau, les prototypes de capteurs pour l'irrigation gravitaire seront expérimentés sur les parcelles du Domaine du Merle avec les irrigants.



FIGURE 2.20 – Atelier de démonstration dans le cadre du WFL d'Echraf, 2021.

Au delà de leur dimension sociale, les WFLs font office d'atelier, pour la fabrication et la maintenance des technologies. Ils ont permis la mise en commun de certains équipements (voir *infra*), et ont accueilli le matériel de base nécessaire au bricolage (fer à souder, outils, etc.) en prévision de la saison de suivi, et ont ainsi permis d'améliorer l'innovation de manière continue. Les améliorations ont été faites au cours de la saison, sur la base des retours des agriculteurs pilotes, et en réponse aux besoins d'adaptation au terrain. Le rôle des WFLs consistait également à servir d'environnement pour l'appropriation de la technologie et la formation auprès des usagers (Fig.2.21). Nous verrons dans quelle mesure ce cadre peut permettre de favoriser l'adoption et la diffusion des innovations.

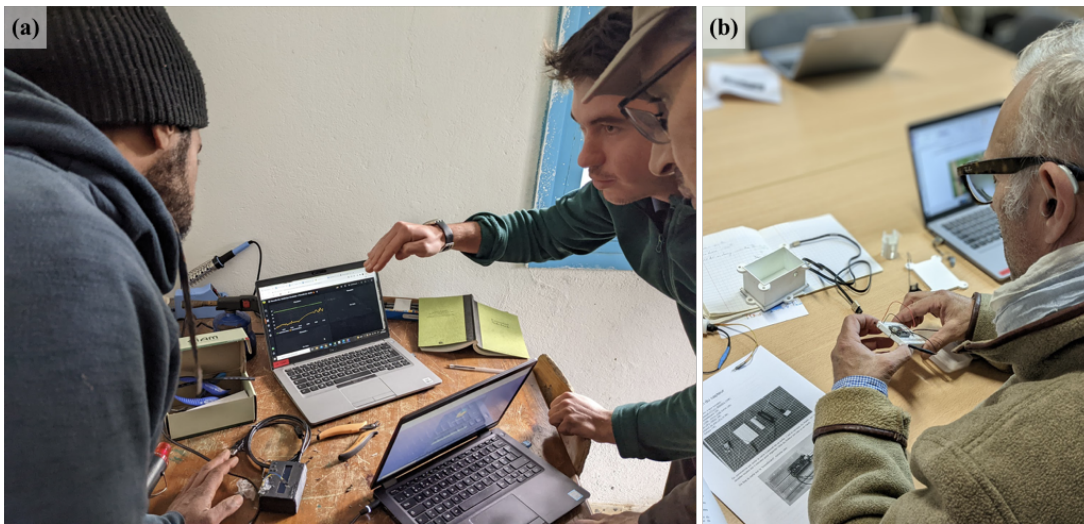


FIGURE 2.21 – Les WFL comme espaces de conception, maintenance et formation : a) WFL d'Echraf et b) WFL de la Crau.

2.4 Article I - Exploring ways to improve agricultural water management in two Mediterranean irrigated systems

Paul Vandôme¹, Crystele Leauthaud¹, Simon Moinard², Insaf Mekki³, Abdelaziz Zairi³, François Charron¹, Julien Leconte¹, Intissar Ferchichi³, Tarek Ajmi³, et Gilles Belaud¹.

[1] G-EAU, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, IRD, INRAE, Institut Agro, Univ. Montpellier, 361 rue J.F Breton, 34196 Montpellier, France.

[2] ITAP, Univ Montpellier, INRAE, Institut Agro, 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France.

[3] Institut National de Recherches en Genie Rural Eaux et Forets (INRGREF), Univ. Carthage LR16INRAT05 L.STA, Tunis, Tunisie.

Ces travaux ont été présentés à l'assemblée scientifique de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (IAHS, Juin 2022) dans le cadre de la session "*Sustainable water management in agricultural areas*", et ont été soumis pour publication dans la revue des *Proceedings of IAHS* : doi.org/10.5194/iahs2022-90.

2.4.1 Résumé

Le changement climatique et un usage de l'eau déraisonnable risquent d'exacerber les tensions déjà existantes sur la ressource, en particulier dans le contexte méditerranéen. En dépit d'investissements importants dans des équipements modernes, coûteux d'un point de vue économique et énergétique, les performances de l'agriculture irriguée demeurent souvent en dessous des attentes, notamment en raison de pratiques d'irrigation inadéquates. Ces dernières peuvent être le résultat d'un usage limité d'outils d'aide à la décision et d'un manque de connaissance vis à vis des dynamiques des eaux d'irrigation. L'accès à l'information à un niveau sans précédent, via des capteurs low-tech à bas coût accessibles, peut représenter un levier majeur afin de mieux identifier les gains de performance atteignables,

à différentes échelles spatiales et temporelles, et guider les usagers de l'eau vers des pratiques plus durables. En vue d'explorer cette hypothèse, nous avons travaillé sur l'émergence de telles technologies au sein de deux systèmes irrigués méditerranéens (Provence, France et Cap Bon, Tunisie) confrontés à de sérieuses problématiques de gestion de l'eau. Des enquêtes ont été conduites sur chaque site d'étude afin d'identifier localement les principaux besoins et contraintes qui limitent une gestion de l'eau plus durable, et les potentiels leviers pour améliorer les performances de l'irrigation. Des technologies innovantes (capteurs d'eau, automatisation, réseaux de communication et internet des objets (IoT)) ont été développées en réponse et testées en conditions réelles à travers une approche participative. Cette démarche a mené à la conception de systèmes low-tech, à basse consommation énergétique (low-energy) et à bas coût (low-cost), en s'appuyant sur l'hypothèse que le manque d'accessibilité - coûts pour l'investissement et la maintenance, intelligibilité - des équipements existants était un frein à la dissémination des innovations dans le secteur agricole. Nous pensons que l'adoption de telles technologies pourrait contribuer à améliorer la durabilité des systèmes irrigués en intervenant à plusieurs niveaux : promouvoir un usage de l'eau approprié et économe en accompagnant la prise de décision ; aider à maintenir la production agricole en réduisant le coût des intrants ; améliorer les conditions de travail des usagers de l'eau. De manière générale, accompagner la transition vers des pratiques plus durables, en apportant aux acteurs de l'agriculture irriguée des clés pour une meilleure compréhension de leur système. Les gains de performance atteignables à travers l'usage de ces innovations, en tenant compte de leurs faiblesses inhérentes (ex. plus faible robustesse et précision), et les impacts potentiels de leur adoption à plus large échelle restent à évaluer de manière intégrée.

Exploring ways to improve agricultural water management in two Mediterranean irrigated systems: promises of wireless low-tech sensor networks

Paul Vandôme¹, CrysteLe Leauthaud¹, Simon Moinard², Insaf Mekki³, Abdelaziz Zairi³, François Charron¹, Julien Leconte¹, Intissar Ferchichi³, Tarek Ajmi³, and Gilles Belaud¹

¹G-EAU, AgroParisTech, Cirad, IRD, INRAE, L'Institut Agro, Univ. Montpellier, Montpellier, France.

²ITAP, Univ. Montpellier, INRAE, L'Institut Agro, 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France.

³Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), Univ. Carthage, LR16INRAT05 L.STA, Tunis, Tunisie.

Correspondence: Paul Vandôme (paul.vandome@gmail.com)

Abstract. Unsustainable use of water resources and climate change will exacerbate the already existing tensions on resources, especially in the Mediterranean context. Despite investments in modern, economically and energetically costly equipment, the performance of irrigated agriculture remains below expectations, notably because of inappropriate irrigation practices, due to insufficient knowledge of irrigation actual need and limited use of decision support tools. Access to information at an unprecedented level, via easily accessible low-cost and low-tech sensors, may be a major lever for better identifying achievable performance gains, at different spatial and temporal scales, and for guiding stakeholders towards more sustainable practices. To explore this hypothesis, we have worked on the emergence of such technologies within two Mediterranean irrigated systems (Provence, France, and Cap Bon, Tunisia) facing major water use efficiency issues. Interviews were conducted on each site in order to identify main local needs and constraints that limit sustainable water management, and potential levers to improve irrigation performance. Innovative technological systems (water sensors, automation, Internet of Things networks) have been developed in response and tested in field through a participatory approach. The technologies were then designed to be low energy, low-tech and low-cost, based on the hypothesis that the lack of accessibility - investment and maintenance costs, system readability - of existing equipment was a brake to the dissemination of innovations in the agricultural sector. We believe that the adoption of such technologies could contribute to improve irrigated systems sustainability by playing on several dimensions: promote suitable and sparing water use by improving decision-making; help maintain agricultural production by decreasing input costs; improving water users' working conditions. Generally, accompanying the transition towards more sustainable practices, by providing to the stakeholders keys for better understanding of their system. The performance gains achievable with these innovations, heeding their inherent weaknesses (eg. lower robustness and accuracy), and the potential impacts of their adoption at a larger scale remain to be assessed in an integrated way.

1 Introduction

The challenge of food security in a context of climate change and demographic growth brings irrigated agriculture - leading consumer of fresh water and source of more than 40 percent of the world's agricultural production - under the spotlight (FAO, 2020). Within irrigated territories, pressure on water resources may causes allocation conflicts between agricultural, ecological, industrial and domestic uses. Major investments have been made to improve the performance of irrigated systems, from plot level to catchment scale. Measuring equipment (flow meters, soil moisture probes, water level sensors...) is among the solutions deployed to support decision-making or irrigation systems automation. However, these tools are still under-used, especially at farm scale and in the global South. The digital boom and recent development of new technologies such as on-board electronics and Internet of Things (IoT) expand the possibilities for better understanding and management of agricultural resources (OCDE, 2019). For irrigated agriculture, these advances offer the opportunity of real-time water flows measurements through wireless sensor networks (WSN) deployed within territories. Many studies have shown that irrigation monitoring is technically feasible by means of systems based on different kinds of sensors, measured parameters and communication networks (Hamami and Nassereddine, 2020). Work has been done on diverse agronomic conditions and some studies have shown that performance gains are achievable with the help of such tools (Liao et al., 2021; Bwambale et al., 2022). However, to the best of our knowledge few studies have gone beyond the purely conceptual and technological aspects and actually tried to match such innovations with agrarian contexts. This article describes first the paths that led to the development of technological innovations within two irrigated territories and second provides an insight of the innovations that were implemented.

2 Methods and study sites

2.1 Shaping innovation to match territories

The aim of the first phase of the process is to understand the agrarian contexts and identify main issues related to agricultural water management. An agrarian diagnosis is carried out on two irrigated territories. Data is collected through a field survey campaign. To understand the main trajectories of local agriculture, open interviews with key resource persons and retired farmers are conducted. Around thirty semi-directive technical and economic interviews are conducted with farmers on each case study site. Besides we performed interviews with network operators and heads of water user associations, institutions, producers' and environmental associations. The analysis of these survey data allows i) to build a typology of the farming and cropping systems composing the irrigated territories; ii) to identify the performance gaps; iii) a first insight into the innovation potential in the area, i.e. the identification of practices or tools improving performances and the inclination of stakeholders for innovation (access to education, digital technology, awareness of the stakes, investment capacity, etc).

At this stage, two cases may be encountered: innovation is existing on the territory, some "pilot" stakeholders (suppliers, farmers, managers) have developed expertise and tools to meet local needs. In this case, the objective is to support the existing innovation by asking why its adoption is limited for the moment, and by what means these solutions can be improved to encourage their dissemination. In the second case, the survey does not reveal any particular local innovation, despite the

identification of strong water management issues. In this situation, the method consists of thinking up and designing new tools with the water users.

The design of innovations is based on a participatory approach, which aims to involve stakeholders throughout the process (Fig.1). The development of the first prototype responds to a set of specifications dictated by the survey results, based on the needs and constraints formulated by the stakeholders. The tool is then introduced to potential users in the form of demonstration workshops, and then evolves regularly based on their feedback. Within the territories, work spaces for the design and maintenance of the systems (fab-labs), also providing a place for interaction on the topic, are set up. Field trials carried out at "pilot" farmers' plots are an opportunity to test the technologies in real conditions, while user feedback contributes to the continuous improvement of the solutions developed.

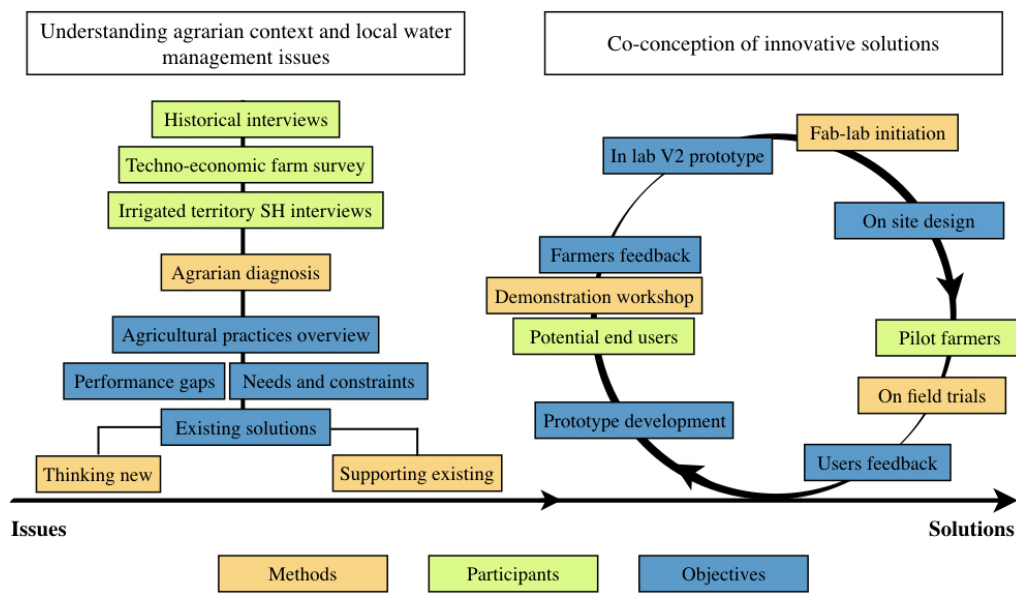


Figure 1. Shaping innovation to match territories. SH: stakeholders.

2.2 Case-study sites

To explore our hypotheses, we experimented the envisaged method within territories known for the water management challenges they are facing (pressure on the water resource, agro-economic constraints). It was important that the study sites show a diversity of agrarian contexts (cropping and farming systems, access to the resource) while being representative of the key issues of irrigation in the Mediterranean basin.

2.2.1 The Crau plain, South of France

The Crau plain is located in the South-East of France, on the Mediterranean coast. The area has no natural river, but a network of irrigation canals developed over 500 years distributes the resource across the plain. The plain covers a vast groundwater table, the hydrodynamic functioning of which is highly dependent on anthropogenic activities (recharge and withdrawals). Water management in the Crau plain lies on a fragile balance between the different water uses. Three main productions require irrigation in the area: Crau hay, whose gravity fed irrigation is supplied by the collectively managed surface network, arboriculture and market gardening, which mostly use groundwater to feed localized irrigation systems.

2.2.2 The Haouaria plain, North of Tunisia

The Haouaria plain is located at the northern tip of the Tunisian Cap Bon, governorate of Nabeul. The water resource of the plain is exclusively groundwater (agricultural, domestic and industrial water). The water tables, both deep and superficial, are heavily exploited by the numerous surface wells and boreholes. Access to agricultural water may be organized within public irrigated schemes through water users' associations, or private through individual pumping. The main irrigation system is drip irrigation, both for tree crops (citrus, olive) and market gardening (potato, tomato, chilli, groundnut, etc.).

3 Results

3.1 Innovation pathways

In the Crau plain, the hay cropping system and the associated irrigation practices crystallise the issues and conflicts surrounding agricultural water management. Gravity irrigation is constraining in terms of workload and difficult to control. Many factors are at the root of performance gaps with strong consequences on the volumes withdrawn. Farmers and managers emphasise the lack of information that would be required to improve their practices (water advancement along the plot, irrigation events duration, water level in the canals, etc.). The search for solutions is active within the territory and several actors have contributed to the emergence of technological innovations (e.g. water gates controlled by timers, water detection systems). However, these innovations have not been widely disseminated throughout the territory, for technical and practical, economic or social reasons.

In the Haouaria plain, drip irrigation of vegetable crops on sandy and draining soils is problematic. Significant differences in water productivity are observed between users, who account for the high equipment cost without succeeding in reducing the volumes applied and the associated fees. The lack of information and the variable flow rates delivered by the network make irrigation monitoring complex. On citrus farming systems, the use of water tensiometers has been observed to adjust the irrigation schedule and reduce percolation losses, but the tool is hardly adopted due to its lack of technical (direct reading of the tension) and economic accessibility.

3.2 Overview of the innovation basket

The innovation process has led to the development of different kinds of technologies: i) the "Pilowtech", a capacitive based soil moisture sensor for drip irrigation monitoring; ii) the "WatAr sensor", which aims to provide information about surface water advancement for border irrigation and iii) the "Flowter" sensor, for the monitoring of gravity based irrigation schedule (Fig.2).

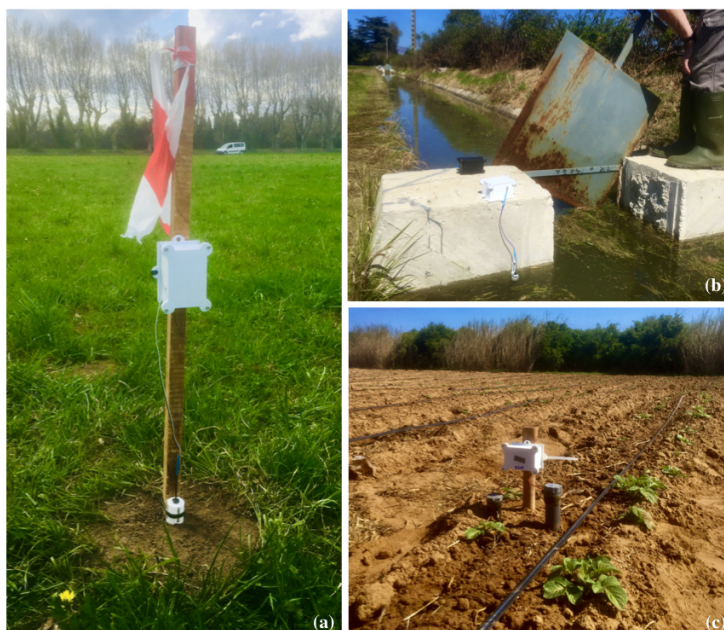


Figure 2. Example of innovations developed: WatAr sensor (a), Flowter sensor (b), Pilowtech sensor (c).

The technologies are designed to follow common properties, in response to common concerns raised on both study sites. They are low-tech, meaning easy to maintain and to reproduce by users. They are low-cost, so they may be used by any farming system. They are wireless and low-power, so they are autonomous without the need for regular visits. Developed systems are all based on open-source micro-controllers and LoRaWAN communication protocol. The data reading (historic and real-time) is made available to each user on an internet platform developed under Grafana cloud. A threshold-based alert system is set up through a smartphone messaging application. Besides collective features, the innovations differ relatively to the territories they have been designed for. The solutions developed in the Crau plain provide binary information about surface water flows. WatAr sensors localised downstream on the plot are alerting the farmer when time has come to operate the water gate and irrigate the next plot. Flowter sensors, placed in the tertiary channels, allow to monitor and record surface irrigation schedule (frequency and duration) at plot scale. On the other hand, the innovation that emerged from the plain of Haouaria allows double depth continuous soil moisture measurement and data is readable in various formats (moisture content percentage, graphic display of soil water storage level) both online and on-site.

4 Conclusions

The fieldwork carried out on the two study sites made it possible to identify needs relating to agricultural water management that are specific to each irrigated area. The methodology of the innovation process was adapted to the agrarian contexts. Regular exchanges with stakeholders led to the design of an innovation basket reflecting the inherent needs and constraints of the territories. The wireless water sensors developed meet common objectives and constraints for both irrigated systems: they represent technically and economically accessible means of real time and continuous flow measurement. The plasticity of on-board electronics and IoT systems then allows solutions to be adapted locally. Innovations are not static and continue to change as they are used in the field and feedback are made. Thus, recent technological advances in these fields presage progress in agricultural water management, provided that innovation is adapted to the territories and not the other way around. The impacts of these technologies adoption on the irrigated agriculture performances remain to be assessed. An integrated multi-criteria and multi-scale approach should help determine the achievable performance gains without neglecting potential undesirable effects. It would also be interesting to study the process of adoption of these tools in the longer term and on a larger scale: their re-appropriation by users, and the probable "bricolage" that would make them change over time.

Author contributions. This paper is part of PV PhD work. CL, GB, IM and AZ are the PhD supervisory team and provide conceptual, technical and editorial support. SM, FC, JL, IF and TA contributed to resources and investigation.

Competing interests. The authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgements. This paper is part of the first author PhD project, funded by the CIRAD and the Occitanie region. The work is carried out as part of the European programme HubIS (PRIMA 2019). We gratefully acknowledge CTV Haouaria, GDA Chraf, ASA Haute Crau and the Domaine du Merle for participating in the project. The cooperation of the farmers in the Chraf irrigated scheme and across the Crau plain was highly appreciated.

References

- Bwambale, E., Abagale, F. K., and Anornu, G. K.: Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review, *Agricultural Water Management*, 260, 107 324, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>, 2022.
- FAO: The State of Food and Agriculture, <https://doi.org/10.4060/cb1447en>, 2020.
- Hamami, L. and Nassereddine, B.: Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105 782, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105782>, 2020.
- Liao, R., Zhang, S., Zhang, X., Wang, M., Wu, H., and Zhangzhong, L.: Development of smart irrigation systems based on real-time soil moisture data in a greenhouse: Proof of concept, *Agricultural Water Management*, 245, 106 632, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106632>, 2021.
- OCDE: Digital Opportunities for Better Agricultural Policies, <https://doi.org/10.1787/571a0812-en>, 2019.

Chapitre 3

Conception et expérimentation de réseaux de capteurs low-tech pour accompagner la gestion de l'eau agricole

Table des matières

3.1	Introduction du Chapitre 3	86
3.2	Article II - A low cost sensor to improve surface irrigation management	88
3.2.1	Résumé	88
3.2.2	Introduction	89
3.2.3	Materials and methods	90
3.2.4	Results	92
3.2.5	Discussion	94
3.2.6	Conclusion	95
3.3	Article III - Design of a low-cost wireless sensor network for drip irrigation monitoring in Tunisia	97



3.3.1	Résumé	97
3.3.2	Introduction	101
3.3.3	Materials and methods	102
3.3.4	Results	110
3.3.5	Discussion	119
3.3.6	Conclusion	121
3.4	Un système d'automatisation à bas coût pour la gestion de l'irri- gation gravitaire	127
3.4.1	Contexte et objectifs	127
3.4.2	Résultats	128
3.4.3	Expérimentations au champ et perspectives	132

3.1 Introduction du Chapitre 3

Dans le Chapitre 2, nous avons proposé une méthode afin de façonner l'innovation pour répondre aux spécificités des territoires irrigués, qui repose à la fois sur une compréhension fine des contextes agraires par analyse systémique et sur l'implication des acteurs dans le processus d'innovation. Cette approche nous a permis d'identifier les principaux besoins et contraintes relatifs à la gestion de l'eau agricole spécifiques à deux systèmes irrigués méditerranéens. Dans un second temps, la mise en place d'un *Water user Fab Labs* sur les deux sites d'étude a conduit à rassembler des agriculteurs pilotes au sein d'espaces dédiés à la co-conception et à l'expérimentation en conditions réelles d'innovations en réponse aux problématiques rencontrées.

Le chapitre 3 présente les résultats obtenus à travers cette méthode. Au sein des deux *Water user Fab Labs* (WFLs), les besoins et les attentes des agriculteurs ont été traduits sous la forme de cahiers des charges. Les solutions pratiques proposées en réponse ont guidé le développement de nouvelles technologies pour la gestion de l'eau agricole. La comparaison des résultats obtenus à ce stade entre les deux territoires irrigués a permis d'identifier des besoins communs : des outils qui facilitent la gestion de l'eau, simples à fabriquer, à utiliser et à réparer, accessibles économiquement, autonomes en batterie, qui limitent le temps passé au champ pour la pratique de l'irrigation, et qui soient adaptables à l'hétérogénéité des conditions parcellaires au sein des exploitations. Ces besoins se sont traduits sur le plan technologique par le développement de **capteurs connectés low-tech, low-cost, low-energy et open-source**. Les différences de besoin, quant à elles relatives aux spécificités des territoires, se sont traduites par l'intégration de ces capteurs dans des **systèmes adaptés pour l'aide à la décision ou l'automatisation de l'irrigation**. Ces innovations, déployées sous la forme de réseaux de capteurs connectés, ont été expérimentées avec les agriculteurs durant les saisons d'irrigation 2022 et 2023 au sein des deux WFLs.

Ainsi nous verrons à travers le chapitre 3.2 comment le développement d'un système de mesure simple, communiquant à distance une information binaire, peut permettre d'améliorer la gestion de l'irrigation gravitaire. Nous explorerons ensuite dans le chapitre 3.3 la faisabilité et les implications d'un système relativement plus complexe, basé sur la mesure, la conversion numérique et la transmission d'une variable continue, pour le suivi en temps réel de l'irrigation goutte à goutte. Finalement, nous étudierons dans le chapitre 3.4 les possibilités d'un système type émetteur-récepteur, basé sur l'échange de données entre capteurs au champ, ou de l'utilisateur vers le capteur, pour l'automatisation des vannes d'irrigation gravitaire.

Ces travaux, qui s'inscrivent dans la seconde étape de la stratégie de recherche, ont permis d'explorer le potentiel des low-tech numériques pour faciliter la gestion de l'irrigation dans des contextes sociaux et technico-économiques différents. Au delà des opportunités communes, les résultats ont souligné l'importance de la démarche participative pour la conception d'une innovation adaptée aux besoins locaux, et de la plasticité de la low-tech pour répondre à cet objectif.

3.2 Article II - A low cost sensor to improve surface irrigation management

Paul Vandôme¹, Simon Moinard², Guilhem Brunel², Bruno Tisseyre², Crystele Leauthaud¹, Gilles Belaud¹.

[1] G-EAU, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, IRD, INRAE, Institut Agro, Univ. Montpellier, 361 rue J.F Breton, 34196 Montpellier, France.

[2] ITAP, Univ Montpellier, INRAE, Institut Agro, 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France.

Ces travaux ont été publiés dans les actes de la Conférence Européenne de l'Agriculture de Précision (*Precision agriculture '23*) : DOI 10.3920/978-90-8686-947-3_41. Ils ont été présentés par le second auteur à l'ECPA 2023, Bologne, et nous prévoyons leur soumission à la revue *Precision Agriculture* dans une version étendue.

3.2.1 Résumé

Cette étude présente le développement et l'évaluation d'un système de capteur à bas coût pour optimiser la gestion de l'irrigation de surface à l'échelle de la parcelle. Au cours d'une irrigation gravitaire, l'eau s'écoule selon la pente du champ et la prédiction du moment optimal pour arrêter l'irrigation est complexe et exigeante en temps de travail. Au sein de tels systèmes, les outils de mesure sont peu communs et ceux existants sont trop complexes et onéreux pour être utilisés comme des outils d'aide à la décision dans de petites exploitations agricoles. Cet article décrit le développement d'un système Open Source basé sur des technologies à bas coût qui permet : i) la détection de l'eau à l'emplacement du capteur au champ et ii) l'émission d'une alerte sur le téléphone de l'utilisateur. Les caractéristiques météorologiques du système, son fonctionnement et la pertinence de son utilisation ont été testés en conditions réelles au cours d'une saison d'irrigation de champs de foin en région méditerranéenne.

A low cost sensor to improve surface irrigation management

P.Vandôme¹, S.Moinard², G.Brunel², B.Tisseyre², C.Leauthaud¹, G.Belaud¹.

¹*G-EAU, Univ. Montpellier, AgroParisTech, BRGM, Cirad, IRD, INRAE, Institut Agro, 361 rue J.F Breton, 34196 Montpellier, France*

²*ITAP, Univ Montpellier, INRAE, Institut Agro, 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France*

paul.vandome@gmail.com

Abstract

This study presents the development and evaluation of a low-cost sensor-based system to optimize the management of surface irrigation at the field level. During a surface irrigation event, water flows according to the slope of the field and it is difficult and time-consuming to predict the optimal time when inflow should be stopped. In such systems, measurement tools are uncommon and those existing are far too complex and expensive to be used as decision support tools on small farms. This article presents the development of an Open Source system based on low-cost technologies that allows: (i) detection of water at the sensor location in the field and (ii) sending an alert by phone to the user. The metrological characteristics of the system and its suitability were tested in real conditions during one irrigation season of hay fields in the Mediterranean region.

Keywords: Low cost sensor, Agricultural water management, Internet of Things (IoT), Surface irrigation

Introduction

Surface irrigation consists in applying water directly on the soil surface and using gravity for its distribution within the field. This traditional practice is the most widely represented irrigation method in the world, but also the most controversial as it is often considered to have the poorest performance (Pereira and Gonçalves, 2018). Indeed, surface irrigation is often difficult to manage, labour intensive and involves the application of large volumes of water. In a context of water scarcity and tensions on the resource, it is essential to search for ways to facilitate the management of surface irrigation and to favour water savings.

The rise of precision agriculture in recent decades has led to explore different ways to improve the performance of irrigated systems. Several monitoring and decision support tools such as model-based control strategies, field and remote sensing, or automatic irrigation systems have been studied (Ihuoma and Madramootoo, 2017; Zinkernagel et al., 2020). However, the adoption of these technologies remains limited at the field and farm levels, notably because of insufficient economic and technical accessibility (Tey and Brindal, 2012). Recent technological advances in embedded electronics, telecommunication and the Internet of Things (IoT) has enabled the emergence of low-cost and energy-efficient wireless sensor networks (WSN) increasingly used in precision irrigation (Abioye et al., 2020; Bwambale et al., 2022; Hamami and Nassereddine, 2020). Some studies have shown that performance gains are achievable using remote automatic irrigation systems based on real-time soil moisture measurements (Liao et al., 2021; Nawandar and Satpute, 2019).

However, most studies have focused on systems suitable for modern localized irrigation systems (drip, micro sprinkler, hydroponic), and few have attempted to introduce these technologies within surface irrigation systems. The objective of this study was to develop a sensor to improve surface irrigation management that is both reliable and easy to use by farmers. To this end, a low-tech and low-cost tool was designed and tested in field conditions in order to assess the potential benefits and limitations of this technology.

Materials and methods

Experimental field overview

The study area (43.643748N 5.016744E, WGS84) was located in the Crau plain, South of France, in a farm producing surface irrigated hay from an area of 150ha. The cropping system, and particularly the irrigation practices, are representative of that found within the Crau plain comprising 14,000 ha of irrigated hay. The experiments were carried out on an irrigation block of 8 ha, divided into seven fields irrigated successively thanks to a series of six gates. When closed, a gate causes the rise of water level in the channel, and then its overtopping from the canal into the field, at its highest section. Water then flows by gravity toward the lowest section of the field following the slope (around 0.3 % in the NE-SW direction). When water arrives at a certain distance from the incoming canal (after a time that can be of a few hours, depending on the slope, the vegetation density, the flow rate and the plot length), irrigation can be stopped by closing the gate located upstream in the canal. Water inflow to this field hence stops, and the next field starts to be irrigated. The irrigation efficiency is therefore largely controlled by the time when gates are operated.

Prototype specifications

The specifications of the prototype were as follows: (i) the system must allow surface water detection and (ii) wireless data transmission at a frequency of 5 to 10 min; (iii) it must be affordable; (iv) reliable and robust; (v) easy to design and maintain and (vi) energy self-sufficient throughout the whole irrigation season.

Hardware components

The components that were selected to meet the specifications are listed in Figure 1.a). The Cubecell-HTCC01 microcontroller, which enables remote data transmission via the LoRaWAN network, was selected. A passive float sensor was chosen for its simplicity and its low cost. A 2700 mAh LiPo 18650 battery was used for the power supply, allowing a theoretical autonomy of 10 months. Figure 1.b) shows the schematic diagram of the system - hereafter called “*WatAr*”.

Software components and dataflow architecture

The programming of the Cubecell microcontroller was performed in C/C++ language through the open-source Arduino software (IDE) 1.8.19. The LoRaWAN communication protocol was chosen for its low energy consumption and long range ~10 km, suitable for agricultural use (Tao et al., 2021). The commercial solution The Things Network (TTN, the Netherlands) was chosen because it does not require any subscription fee and allows the implementation of a private network with suitable coverage over the study site with one antenna.

Id	Model	Function	Manufacturer	Cost	a)
1	Cubecell HTCC01	Microcontroller	Heltec, China	11.43€	
2	Breadboard	Connector	HMTI, China	1.61€	
3	Water level	Sensor	SeeSensor, China	0.77€	
4	Resistor	Power limiter	Eiechip, China	0.01€	
5	Wires	Connector	Xnbada, China	0.01€	
6	LiPo Battery	Power Supply	DaweiKala, China	2.70€	
Total				16.53€	

Figure 1. Hardware description for the connected irrigation system (“*WatAr*”) design: a) components and costs table; b) electronic diagram.

The dataflow architecture is shown in Figure 2. The purpose of the architecture was to transmit the *WatAr* data from the field to the user's phone, while storing information to enable data processing and analysis. The dataflow developed can be divided as follows: (i) data produced at the field level by the *WatAr* was sent through the LoRa network. Network coverage was provided by specific LoRaWAN antenna on the roof of the farm building, 360m far from the most remote sensor position. The antenna is linked to a “The Things Network Gateway”, selected for its simplicity of use: once powered and connected to the internet via Wi-Fi, the data can be downloaded directly from the dedicated web platform of The Things Network. (ii) The data was then transmitted to a server using a MQTT protocol for processing and storage. Data storage was done using Influxdb (InfluxData, USA), an open-source database for time series. (iii) A script was developed to compare each *WatAr* status data with the previous one. In the case of status change (i.e. when water arrived to the water sensor), an alert was sent to the Telegram smartphone application by means of a Telegram bot. The latter was implemented with the Node-RED (IBM, USA) programming tool.

Assessing the usability of the *WatAr* through in-field tests

Goals of in-field tests were threefold. First, the sensitivity of the sensor was tested. To this end, six *WatAr* were installed in the field during one irrigation event. The time of reception of the alert was recorded and compared to the real observed time of arrival of the water at the *WatAr* location. This experiment was repeated 10 times.

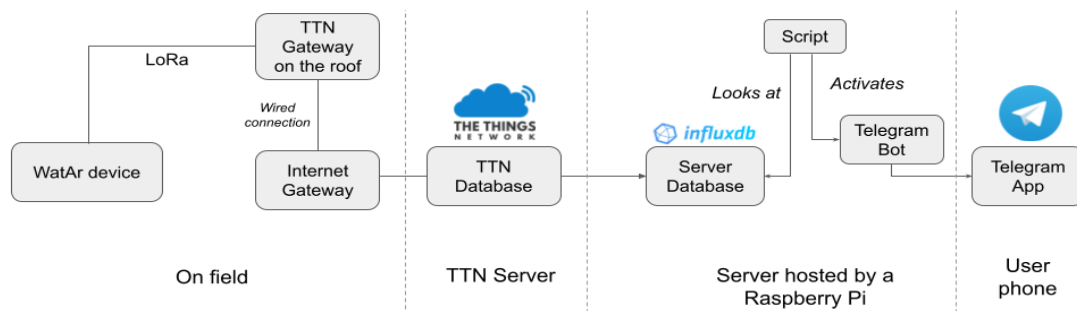


Figure 2. Dataflow architecture: from the device on field to the user’s smartphone.

Second, the robustness of the *WatAr* was tested. To this end, seven fields were equipped with one *WatAr* each during the whole irrigation season, corresponding to 15 irrigation events, from March to October 2022. Monitoring the functioning of the *WatAr* over the whole season allowed to identify any limitations (autonomy, malfunction, etc.). Third, we tested the suitability of the *WatAr* as a decision support tool. To this end, a *WatAr* was installed at 80% of the length of the field with respect to the inflow canal. The arrival of the water layer at this location should in practice lead to stop irrigation, the inertia of the water flow allowing to cover the remaining 20% of the field. Irrigation was then launched and the position of the water front was recorded regularly using a GNSS RTK system (Centipede, France) with a centimetric accuracy. In this controlled situation, the farmer was asked to proceed as usual, and therefore does not have the information provided by the *WatAr*. The frequency and duration of his visits to the field to manage irrigation were recorded in order to assess the potential labour time savings resulting from the adoption of the *WatAr* as a decision support tool.

Results

Design of the *WatAr* prototype

Figure 3.a) shows the *WatAr* prototype under field experiment conditions. The *WatAr* includes two parts: (i) The acquisition module including the microcontroller and its LoRa telecommunication chip, packed in a black 3D printed waterproof package, and (ii) the water sensor in its white 3D printed shell. The sensor is placed on the ground to detect the presence of water. The water sensor contains a magnet that rises along the vertical axis with the level of the water. A magnetic switch sensor is then activated, which allows the presence of water to be detected, defining a high position (Fig 3.b) or low position (Fig. 3.c). In order to save power, the *WatAr* is in a standby mode, checks every five minutes the status of the water sensor (low or high) and send the information through the LoRa network. If the sensor status changes, the information is transmitted to the operator through the Telegram smartphone messaging application (Fig. 3.d). Looking for a compromise between simplicity of design, robustness and cost, the final system costs less than 20€.

Sensitivity analysis of the *WatAr*

The field trials showed that the *WatAr* effectively detected surface water (100% of the irrigation events were detected by the *WatAr* after 60 repetitions). Messaging alerts were received on average 5 minutes after the observation of water arrival at the sensor location. The minimum recorded delay was 2 minutes, and the maximum was 10 minutes after observation. Delays of more than 5 minutes could occur due to the unstable nature or an insufficient water height to keep the water sensor in the upper position.

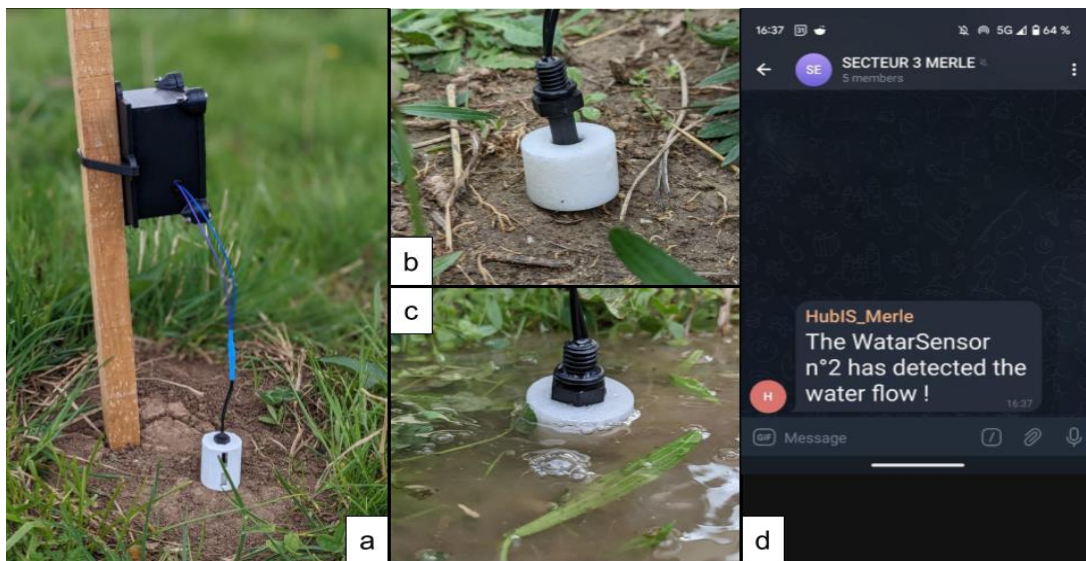


Figure 3. Operational prototype (“*WatAr*”) in use during the 2022 irrigation season: a) the *WatAr* on the experimental site; b) the sensor (without its protective shell) in low position (absence of water), and c) in high position (presence of water) which leads to d) water detection alert in the Telegram application on user's smartphone.

Robustness over the season

The monitoring of *WatAr* sensors throughout the irrigation season allowed to identify any dysfunctions over a long period. On average, 2.5 maintenance operations per sensor over the 8 month season were necessary. Different types of problems were observed and a maintenance protocol was set up to address them. The batteries of some sensors discharged faster than expected in the first months, which accounted for 80% of maintenance operations. The objective was for the power supply to last for the 8 months of the season. In response, the Arduino code was optimised and initial cheap batteries (1.4€/unit) were replaced with higher quality ones (2.7€/unit). Other maintenance operations were necessary in relation to external events, which are not specific to the *WatAr* system, but which may occur in agricultural conditions of use: (i) a storm caused a power outage at the farm that powered the gateway, which led to a 24-hour gap in the data; (ii) a cable connecting a sensor to its acquisition module was accidentally cut, probably during a trimmer operation. At the end of the season, the occurrence of maintenance operations decreased significantly as a result of the continuous improvement of the *WatAr* (no maintenance required during the last two months of the season). Besides the robustness inherent to the technology, some improper irrigation detection occurred in the case of heavy rainfall events. Data was easily cleared as there is no irrigation during rainy days.

Suitability of the *WatAr* as a decision support tool

The results of the in-field tests (Fig.4) showed that the relationship between water advance and time is not linear, meaning the surface water velocity was not constant. In these conditions, it was particularly complex for the farmer to follow the progression of water in each of his fields. This led the farmer to regularly visit his field to check the progress of the water and try to anticipate the right moment to operate the water gates.

The farmer came twice to start and stop the irrigation, and twice more to check the progress of the water through the field. In total, the farmer spent 32 minutes on site. This is more than an hour of labour to irrigate a single field, considering the time it takes to go back and forth from the field to the farm (about 10 minutes each time). Two hours and 32 min. after the irrigation start, the *WatAr* released a water detection alert at its location (80% of the plot length), whereas the farmer, not informed about the position of the water front at that time, turned off the irrigation 28 min. later. Considering the time needed for the farmer to come to operate the gate, the potential gain on the irrigation is 18 min i.e. 10% of the actual irrigation time, representing around 130m³ of water.

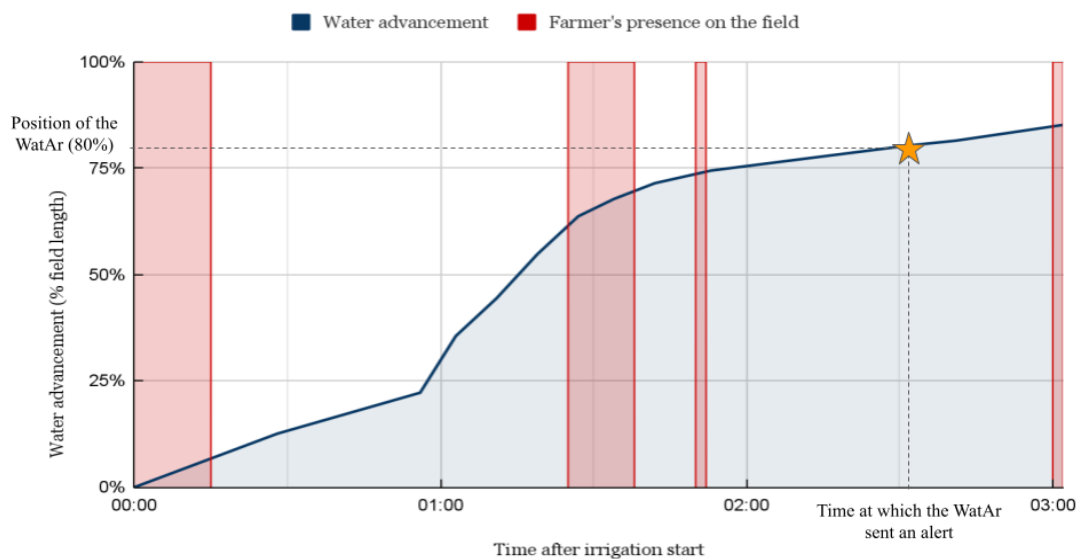


Figure 4. Progression of surface water over time on an irrigated field (total length 270m; area: 1ha). The red zones indicate the farmer's visits to the field. The star indicates when the *WatAr* alert was sent, the farmer not having the message.

Discussion

The *WatAr* allows surface water detection and wireless transmission of this information. The use of low cost components and free software makes the system very affordable (<20€). The data generated is reliable (100% detection of irrigation events), and the information is transmitted quickly to the user (5 min on average). The transmission speed could be improved by changing the frequency of data emission by the microcontroller, but at the expense of battery lifetime. The continuous improvement of the system during the irrigation season improved its robustness over time, especially the battery autonomy, whose recharge represented 80% of the maintenance operations. In addition, the accessibility of the prototype is improved by its low-tech nature. The *WatAr* is indeed easy and quick to design and maintain. To confirm this point, further work led to production of a tutorial for the design and use of the *WatAr*, validated during participatory workshops with different categories of stakeholders in the study area. The open-source aspect makes it a "white box" that can be understood and modulated. The system developed therefore meets the established specifications and appears to be one of the answers to the constraints of surface irrigation.

The system could reduce labour time and irrigation duration. According to the results of our experiment, the use of the *WatAr* would have saved two return trips and about 50% of the time spent on the field. This enables the farmer to focus on other activities without interruption and to be relieved of water flow verification.

Regarding water savings, the potential gain with the use of *WatAr* was around 10% of the irrigation amount in the experiment. Given that a hay field is irrigated around 15 times per season, the adoption of the *WatAr* would result in a potential water saving of 2000 m³/ha/season. This rough estimate needs further refinement (e.g., considering the effect of field characteristics), but we assume that the gain could be even larger with an optimal positioning of the *WatAr*.

WatAr sensors were placed at 80% of the length of the fields. This position was determined empirically by the water users to account for the inertia of the water, which should allow the remaining 20% of the field to be covered after irrigation has stopped. However, the generalisation of this location appears limited given the diversity of factors involved when estimating this inertia (Mailhol and Merot, 2008). For this reason, the positioning of the sensor along the field should be based on farmer's experience. In addition, modelling work could allow to formulate recommendations for the optimal positioning of the sensor. The *WatAr* may also be used to measure some variables: several sensors located along the plot could measure changes in water velocity, a sensor installed at the canal could measure irrigation durations, etc.

With this device, the farmer's intervention to activate the water gates is still necessary after receiving the alert provided by the *WatAr*, and delays in reaction are to be expected when the farmer is busy elsewhere. Further, the system does not provide a solution for night-time water management which remains a significant constraint. For these reasons, further developments will associate the *WatAr* with an automation gate system. The technologies explored in this article should make it possible to produce a prototype allowing the gate to be operated remotely after receiving information on the presence of water downstream from the *WatAr*.

Conclusion

A low cost sensor (*WatAr*), detecting the presence of water at a specific location within a field aiming to facilitate surface irrigation management, was developed and tested in real conditions over one whole irrigation season. The *WatAr* meets several specifications: it allows the detection of surface water and the transmission of the data remotely. Field tests confirmed the robustness and reliability of the system. The low-tech and low-cost hardware and the free open-source software make the *WatAr* highly reproducible, affordable and accessible. Its use should help to improve the performance of surface irrigation systems by saving water and labour time. To go further, the developed system can be extended through automation and the design of a strategy to optimize sensor positioning.

Acknowledgements

This paper is part of the first author's PhD project, funded by the CIRAD and the Occitanie Region (France). The work was carried out as part of HubIS project (EU's PRIMA programme 2019, grant ANR-19-P026-0006-02). We are grateful to the Domaine du Merle for participating in the project.

References

- Abioye, E.A., Abidin, M.S.Z., Mahmud, M.S.A., Buyamin, S., Ishak, M.H.I., Rahman, M.K.I.A., et al., 2020. A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture* 173, 105441. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441>
- Bwambale, E., Abagale, F.K., Anornu, G.K., 2022. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management* 260, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>
- Hamami, L., Nassereddine, B., 2020. Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 179, 105782. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105782>
- Ihuoma, S.O., Madramootoo, C.A., 2017. Recent advances in crop water stress detection. *Computers and Electronics in Agriculture* 141, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.026>
- Liao, R., Zhang, S., Zhang, X., Wang, M., Wu, H., Zhangzhong, L., 2021. Development of smart irrigation systems based on real-time soil moisture data in a greenhouse: Proof of concept. *Agricultural Water Management* 245, 106632. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106632>
- Mailhol, J.C., Merot, A., 2008. SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region. *Irrigation Science* 26, 289–302. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0099-3>
- Nawandar, N.K., Satpute, V.R., 2019. IoT based low cost and intelligent module for smart irrigation system. *Computers and Electronics in Agriculture* 162, 979–990. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.027>
- Pereira, L.S., Gonçalves, J.M., 2018. Surface Irrigation. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford, England: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.248>
- Tao, W., Zhao, L., Wang, G., Liang, R., 2021. Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture* 189, 106352. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106352>
- Tey, Y.S., Brindal, M., 2012. Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications. *Precision Agriculture* 13, 713–730. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9273-6>
- Zinkernagel, J., Maestre-Valero, Jose.F., Seresti, S.Y., Intrigliolo, D.S., 2020. New technologies and practical approaches to improve irrigation management of open field vegetable crops. *Agricultural Water Management* 242, 106404. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106404>

3.3 Article III - Design of a low-cost wireless sensor network for drip irrigation monitoring in Tunisia

Paul Vandôme¹, Crystele Leauthaud¹, Simon Moinard², Oliver Sainlez¹, Insaf Mekki³, Abdelaziz Zairi³, Gilles Belaud¹.

[1] G-EAU, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, IRD, INRAE, Institut Agro, Univ. Montpellier, 361 rue J.F Breton, 34196 Montpellier, France.

[2] ITAP, Univ Montpellier, INRAE, Institut Agro, 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France.

[3] Institut National de Recherches en Genie Rural Eaux et Forets (INRGREF), Univ. Carthage LR16INRAT05 L.STA, Tunis, Tunisie.

Ces travaux ont été publiés dans la revue *Smart Agricultural Technology* : doi.org/10.1016/j.atech.2023.100227.

Tout le software nécessaire à la conception des systèmes développés est disponible en ligne : doi: [10.17632/t58td9fpv9.1](https://doi.org/10.17632/t58td9fpv9.1).

3.3.1 Résumé

Un usage non durable de l'eau et le changement climatique vont exacerber les tensions déjà existantes autour de la ressource, en particulier dans le contexte méditerranéen. En dépit d'investissements onéreux dans des équipements modernes, les performances de l'agriculture irriguée demeurent en deçà des attentes, notamment en raison du manque de données hydriques disponibles et de l'usage limité des outils d'aide à la décision. Bien qu'une diversité de capteurs d'humidité du sol soit disponible sur le marché, ces derniers ne sont pas largement utilisés par la communauté agricole du fait de leur coût élevé et de leur complexité. L'accès à l'information à un niveau sans précédent, à travers des capteurs low-tech et low-cost plus accessibles, pourrait représenter un levier majeur pour une meilleure identification des gains de performance atteignables,

et pour accompagner les acteurs vers une gestion efficiente de la ressource en eau. Afin d'explorer cette hypothèse, un capteur d'humidité du sol connecté et open source, à basse consommation d'énergie et accessible techniquement et économiquement, a été développé. L'outil a été conçu selon les besoins et attentes d'usagers de l'eau et expérimenté au sein d'un périmètre irrigué tunisien soumis à de sérieuses contraintes hydriques. Le fonctionnement du réseau de capteurs connectés a été testé avec les agriculteurs sur des parcelles pilotes durant une saison de culture et comparé avec des capteurs du commerce. Nous proposons une double méthode de calibration reposant sur un seul paramètre, réalisable en laboratoire ou sur le terrain. Le capteur développé peut être utilisé pour le suivi de l'irrigation en temps réel et comme un outil d'aide à la décision pour la gestion de l'eau.

Highlights

Making technological innovations accessible to agricultural water management: design of a low-cost wireless sensor network for drip irrigation monitoring in Tunisia

Paul Vandôme, Crystele Leauthaud, Simon Moinard, Oliver Sainlez, Insaf Mekki, Abdelaziz Zairi, Gilles Belaud

- We developed a low-cost, low-tech, low-energy, open-source IoT-based soil moisture sensor
- Both in-field and in-lab single parameter calibration methods are possible
- The sensor is usable as a decision-support tool for real-time irrigation monitoring
- Do it yourself: all the steps from design to calibration are highly reproducible
- Open source data is available for download

Making technological innovations accessible to
agricultural water management: design of a low-cost
wireless sensor network for drip irrigation monitoring in
Tunisia

Paul Vandôme^a, Crystele Leauthaud^a, Simon Moinard^b, Oliver Sainlez^a,
Insaf Mekki^c, Abdelaziz Zairi^c, Gilles Belaud^a

^a*G-EAU, AgroParisTech Cirad IRD INRAE Institut Agro Univ. Montpellier Montpellier
France.*

^b*ITAP, Univ. Montpellier INRAE Institut Agro 2 Place Pierre Viala 34060 Montpellier
France.*

^c*Institut National de Recherches en Genie Rural Eaux et Forets (INRGREF) Univ.
Carthage LR16INRAT05 L.STA Tunis Tunisie.*

Abstract

Unsustainable use of water resources and climate change will exacerbate the existing tensions surrounding resources, especially in the Mediterranean context. Despite investments in costly modern equipment, the performance of irrigated agriculture remains below expectations, notably because of the lack of available water data and the limited use of decision support tools. Although a variety of soil moisture sensors are available on the market, they are not widely used by the agricultural community because of their high cost and complexity. Access to information at an unprecedented level, via easily accessible low-cost and low-tech sensors, may be a major lever for improved identification of achievable gains in performance, and to guide actors toward efficient water management. To explore this hypothesis, an open source wireless soil moisture sensor, low-energy and economically and technically accessible, was developed. The tool was designed according to water users' requirements and applied to a Tunisian irrigation scheme subject to major water use efficiency issues. The functioning of the wireless sensor network was tested on pilot plots over a growing season and compared with commercial sensors. A single parameter calibration can be performed in either the laboratory or the field. This low-cost sensor can be used for real-time irrigation monitoring and as a decision-making tool for water management.

Preprint submitted to Smart Agricultural Technology

June 26, 2023

Keywords: Agricultural water management, Drip irrigation monitoring, Low cost soil moisture sensor, Wireless sensor network, Internet of Things (IoT), LoRa network

Corresponding author: paul.vandome@gmail.com

1. Introduction

Irrigation is a fundamental aspect of crop production. Summer 2022, already considered to be one of the driest and warmest seasons ever recorded in Europe and the Mediterranean basin [1], has shown how crucial it can be [2], and what is more, the Mediterranean region is considered as a climate change hotspot. The Intergovernmental Panel on Climate Change [3] foresees the intensification of extreme hydrological events, notably more frequent and longer episodes of water deficit. Agricultural activities, largely dependent on water availability, are particularly impacted and threatened. Irrigation is a response to agricultural vulnerability to drought. As a result, irrigated land has increased in recent decades, and the increase will most probably continue in the future.

However, pressure on water resources is already critical in the Mediterranean region, due not only to the high spatio-temporal variability of its distribution but also to increased urban and rural demand. In particular, agricultural water demand tends to grow with increasing potential evapotranspiration. These tensions have already led to water use restriction policies, user conflicts and water shortages [4]. In this context, it is indispensable to improve agricultural water management and encourage water-saving practices. Precision agriculture has flourished in recent decades and a wide range of monitoring tools including model-based control strategies, automation systems, remote sensing or in field sensing [5, 6] have been developed to improve the performance of irrigated systems. At farm level, irrigation management can be supported by using soil moisture probes to improve irrigation scheduling and reduce the volumes applied throughout the growing season [7, 8]. Tensiometers and capacitance sensors that provide information on soil water status are already available [9] but are rarely used in farming systems, particularly at the farm scale, and even more rarely in the Global South. The different barriers to the adoption of precision farming technologies are linked to the user's socio-technical environment, but mostly to (i) economic rationales or

(ii) the complexity of using these technologies, including the calibration procedures [10, 11].

Recent technological developments such as onboard electronics and Internet of Things (IoT) offer new opportunities to provide alternative monitoring tools for agro-systems and resource management [12] that are easier for farmers to use than previous systems. For irrigated agriculture in particular, these technologies allow real-time monitoring of water flows through water sensor networks (WSN) that can be installed at the required spatial and temporal scale. Several studies have demonstrated the technical feasibility of monitoring irrigation using these types of systems with different telecommunication networks and sensors to monitor weather, soil and plant variables [13, 14, 15]. Some studies mentioned gains in irrigation performance in different agronomic contexts thanks to the use of such tools [16, 17, 18]. Recently, some advances were made in the characterisation and calibration of low cost capacitance sensors for IoT networks [19, 20]. However, to our knowledge, no study has yet gone beyond laboratory prototypes or experiments in controlled conditions, and have adapted these innovations to local agrarian contexts. The objective of this study was thus to fill this gap by developing a soil moisture sensor that is easily adoptable by water users and to share all the steps, from design to calibration, operation and maintenance, based on a field reality. To this end, we designed an open source, low-tech and low-cost tool with a single parameter and physically-based calibration method, tested it in real farmers' conditions, and assessed the potential advantages and limits of this technology.

2. Material and methods

2.1. *Shaping innovation: our overall approach*

We argue that for technological innovations to be useful for end users, the innovations need to be co-developed with the stakeholders thus making it possible to adapt the technology to the local context. A co-innovation process between researchers and stakeholders was established to (i) chose the variable to monitor; (ii) build the sensor and (iii) evaluate its use. This was done through a loop back procedure described in Vandôme et al. [21]. After diagnosing the agrarian context, local water management issues and stakeholder needs, a sensor prototype was submitted to water users through a demonstration workshop.

The feedback provided by the workshop participants enabled the production of a second version of the prototype that was better suited to local needs and constraints. The creation of an area for the design, maintenance and sharing between the actors of the co-innovation process – hereafter called Fab Lab – allowed the innovation to continually evolve based on the users' feedback throughout the process.

2.2. Study site and water user requirements

The Echraf public irrigation scheme is located in the Haouaria agricultural plain, at the northern tip of the Cap Bon peninsula in Tunisia (36°59'33.529"N, 11°2'28.309"E). Drip irrigation of market gardening crops grown on sandy and draining soils has resulted in several problems. The reduced soil water holding capacity (around 4%) makes irrigation management complex: on the one hand the permanent wilting point (PWP) is quickly reached due to rapid drying of the soil; while on the other hand, the root profile is quickly saturated during an irrigation event, leading to percolation losses. In these conditions, optimal irrigation would theoretically involve regular application of low water volumes. In practice, this strategy is difficult to achieve for the farmers, due to (i) lack of information concerning the water resource (volumes applied, discharge rates, soil moisture, surface area irrigated), (ii) the variable flow rates of water supplied by the collective network, (iii) poor uniformity of application due to ageing or low quality irrigation equipment, and (iv) the recent emergence of drip irrigation technology in the region, which has not been combined with any training for water users. In the first stages of the co-innovation process, the stakeholders and the researchers agreed that, to solve these problems, a soil moisture sensor – hereafter termed Pilowtech – should be used in the field to assess crop water availability. To further develop this idea, a Fab Lab was set up in the Water Users Association (WUA) building where exchanges with farmers led to a set of specifications (Table 1) that were then used to design prototype soil moisture sensors. The Fab Lab was also used for the production and repair of the sensors. In parallel, three pilot farmers volunteered to host tests of the sensors in real conditions in three irrigated potato plots throughout the whole crop cycle.

Table 1: Set of specifications for the development of the water sensor defined during the co-innovation process

Stakeholder requests and expectations	Practical response
Information on when/how much to irrigate	Soil moisture sensor
Economically accessible to farmers	Low-cost hardware/no cost software
Easy to design, use and maintain	Low-tech and open access
Autonomous	Wireless, low-power
Adapted data reading procedure	Onsite and online data reading
Adapted to different soils	On field calibration method

2.3. Water sensor network: General framework

In response to the end-users' stated needs, we built a network of wireless, low-cost, low-tech, low-power and open-source soil moisture sensors. The overall architecture of the network of sensors is shown in Figure 1.

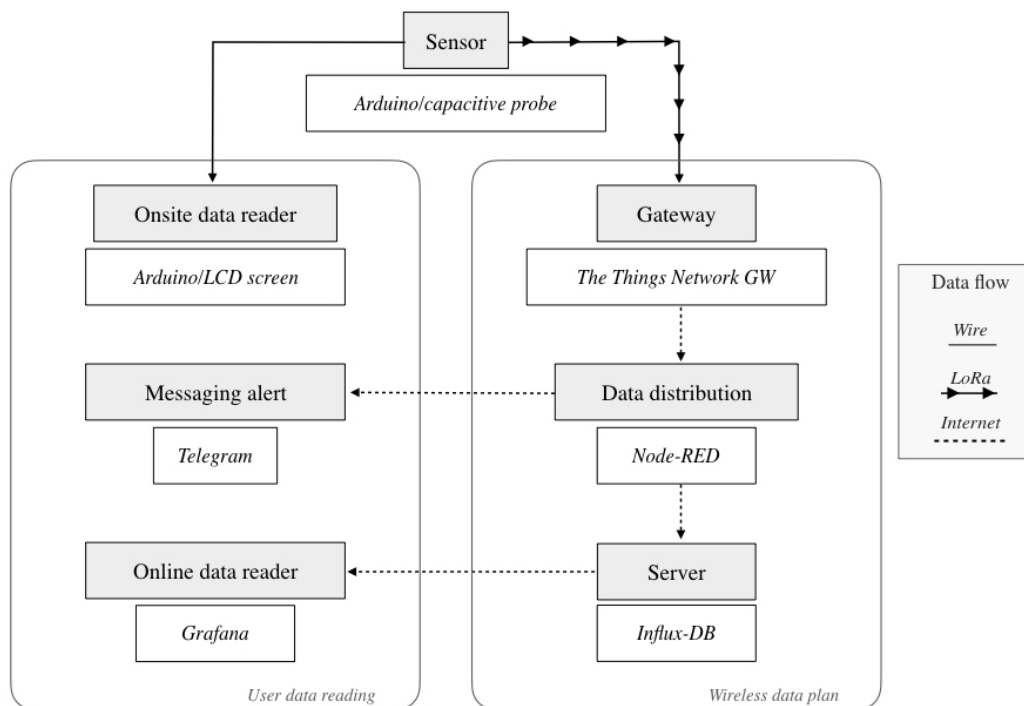


Figure 1: Flowchart of the water sensor network

2.3.1. *Hardware components*

The Pilowtech sensor is composed of a soil moisture probe, a data acquisition module and a power supply. The capacitance soil moisture sensor – model EK1940 v1.2 – was chosen for its resistance to corrosion, its low cost and availability. In addition, it operates over a voltage range of 3.3V to 5V, making it compatible with low-power microcontrollers. The data acquisition module includes a microcontroller, a communication microchip and small electronics (wires, resistors, breadboard). The microcontroller chosen was the Arduino Pro Mini, with a 3.3V voltage and a frequency of 8MHz. In addition to the advantages of Arduino systems (widely used, easy to use and open-source), thanks to its small size, the Pro Mini is easy to embed and is one of the cheapest controllers on the market. It is also compatible with the LoRaWAN (Long-Range Wide-Area Network) communication protocol. The LoRa SX1276 communication module makes it possible to send and receive data via the LoRa radio network. The whole device is powered by a rechargeable Li-ion 18650 battery (3.7V and 3500 mAh).

To allow onsite and instantaneous data reading, a reader was further developed based on an Arduino Uno board and a liquid crystal display (LCD) shield. The system is powered by a rechargeable Li-ion power bank with a 3.7V output. To avoid damage caused by humidity, the probes were assembled at the end of PVC pipes (Ø40). Silicone was used to guarantee a tight sealing at the junction of the probe/pipe and the heat-shrink tubing at the wire junctions. The case of the acquisition module was printed using a 3D printer. The 3D printing file is available in the research data section at the end of this article.

2.3.2. *Wireless communication network*

IoT technologies allow wireless communication of data generated by devices via different types of networks. The LoRaWAN communication protocol allows data transmission at low data rates (0.3-50 kb/s) and over long ranges (≤ 30 km). Compared to other available networks, the LoRa network stands out for its low energy consumption [22]. The LoRaWAN protocol thus met both our objectives and technological development conditions (sparse plots, no need for heavy data packets) and had also been tested in previous studies [23]. A private LoRa network was set up in the irrigation scheme. Likely due to the topography, two gateways were needed to cover the area that included the three experimental plots. The Things Network gateway, which, according to the manufacturer, has a range of about 10km, was installed near the

Fab Lab. The Things Indoor gateway, which has a shorter range but costs less, was installed between two pilot plots in the eastern part of the irrigation scheme. 4G+ airboxes were used to provide the Wi-Fi required for the gateways internet connection.

2.3.3. Software and data workflow

The microcontroller was programmed in C/C++ language using the open-source Arduino software (IDE) 1.8.19. The program was uploaded from the computer to the Arduino Pro mini using a FTDI wire. To minimize energy consumption, the program code was written to maintain the sensor in sleeping mode (low μA consumption). The system woke up at 5-minute intervals to collect the analog signal produced by the probe, to convert it into digital data and send it through the LoRa network. Theoretically, this optimization enables the sensor to be energy autonomous throughout the irrigation season. The Arduino program is also available in the research data section. The data produced transited locally through the gateway via the LoRa network and was then routed online to the free server "The Things Network Cloud (Europe 1)" [24]. Within this server, the gateway was declared on the cloud and an application gathering sensor (device) IDs was generated. This server allowed real time data reading online but not storage or data processing. The free and open-source flow-based programming tool Node-RED [25], was thus used to gather the data from this online server and store it on a local server via an InfluxDB database [26]. The Node-RED flow is also available in the research data section.

2.3.4. User access to data

Three different types of user access to data were provided through multiple channels to serve end-users with different technology literacy levels: (i) an online platform with access to data time series; (ii) a mobile phone messaging alert system; and (iii) an onsite data reader (Fig.1). The online data reading is done using Grafana software [27], a free open-source data visualization and processing platform. A dashboard was produced to visualize data from each pilot farm. The dashboard comprised time series graphics for each soil moisture sensor (specified by its location and depth) and a map showing the location of the sensors. Data could be combined for visualization at different levels (plot, farm, irrigation scheme – the highest level being defined by the network). In parallel, Grafana enabled the development of a messaging alert system using the Telegram smartphone application and Telegram bots.

The alert system was set to send a message to the end-user each time the soil water content (i) dropped below a threshold value (permanent wilting point), corresponding to a certain level of crop water-induced stress; or (ii) reached field capacity, in order to stop irrigation. The onsite data reader was designed for instantaneous visualization. The farmer has to physically plug the onsite reader into the sensor to get an instant display on the LCD screen. The reader can be programmed to display the volumetric soil moisture content, or the % refill level of total available soil moisture. Both Arduino programs are available in the research data section.

In all cases, it is necessary to provide the user with data that can be easily used and guide their decision-making. The data emitted by the sensors and stored on the server are raw data, proportional to the output voltage of the capacitance probe. It is therefore necessary to define the relationship between soil moisture and raw values, before processing the data using visualization tools.

2.4. Calibration of the capacitance probe

The capacitance probe operates according to the following principle: electric current flows through a coplanar concentric capacitor, which is the part inserted into the soil. The capacity is proportional to the relative dielectric permittivity of the medium, which itself depends on the soil moisture content. The output voltage (0-5V) is converted into a digital value (10 bits) by the analog-to-digital converter (ADC) of the microcontroller. Two calibration protocols based on the gravimetric method are proposed to determine the relationship between the output voltage and soil moisture.

2.4.1. Calibration in the laboratory

Laboratory experiments allowed us to determine the relationship between the output values of the sensor (ϵ) and the volumetric soil moisture (θ_v , % volume). The gravimetric method was used. Three soil samples (S1, S2, S3) were collected from the 0-30cm horizon in three separate plots in the irrigation scheme. In parallel, bulk density was measured in each plot using the cylinder method. Samples were first dried in a heating chamber at 105 °C for 24 hours and then left to cool at room temperature (20°C). The dry soil samples were then used to fill a beaker of known volume (150mL) while making sure the field bulk density was maintained by weighting the beaker.

The volumetric humidity (θ_v) could therefore be defined by equation (1):

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_s} \cdot 100 \quad (1)$$

where θ_v is the volumetric soil moisture content (%), V_w the water volume, V_s the dry soil volume.

To determine the relationship, the probe was inserted along the entire length of the capacitance device (approximately 6cm), guaranteeing good contact between the soil and the probe. A small volume of water (1.5mL corresponding to an increment of 1% of soil volumetric moisture) was repeatedly added to the sample. At each addition, the soil was mixed to guarantee isotropy, left to rest for 15 minutes and then restored to bulk density. The operation was repeated until the digital value reached a plateau, corresponding to soil water saturation. The digital value of the sensor, ϵ , acquired with the onsite reader, was recorded for each known sample volumetric humidity value, θ_v , in order to establish their correspondence.

2.4.2. Field calibration

The purpose of field calibration was to provide a simple method to locally parametrize the soil moisture sensor without the need for sophisticated equipment. A soil sample was collected from each of the three pilot plots (samples P1, P2 and P3). The protocol was the same as that used in the laboratory with the following adaptations. First, the samples were dried in the sun on the roof for two days, followed by 3 hours in an oven at 100 °C. To check the soil was dry, the sample was weighed on a kitchen scale (precision ± 1 g), then put back in the oven and weighed again. If the mass of soil was unchanged, the soil was considered to be dry. Second, to limit the uncertainty caused by the use of a simple kitchen scale, a large mass of soil was used and the sample was only weighed at initialization. Bulk density could not be measured in field conditions. Consequently, a standard sandy bulk density was defined for the soil samples (1.5kg of dry soil for 1L in a graduated bucket), for which the θ_v - ϵ relationship was established. Water was progressively added using a 10 mL measuring glass (i.e. an increment of 1% θ_v). Readings were made with the sensor in the same conditions as those used for the laboratory calibration. Three replicates were made for each soil sample using three different probes in order to study the potential variability linked to the capacitance probe and its impact on the calibration.

2.4.3. *Properties of the soil samples*

Soil samples from the pilot plots were analyzed in the laboratory. Table 2 lists the main soil properties. Despite slight local heterogeneities, the soils had most properties in common. They are sandy soils ($\geq 90\%$) with low organic matter content ($\leq 1\%$). Water storage capacity is low, with permanent wilting points ranging from θ_v 5% to 7% and field capacity ranging from 9% to 11%. Bulk density is about 1.6 g/cm^3 .

Table 2: Soil samples properties.

Sample	Clay%	Silt%	Sand%	OM%	$EC_{1/5}$ (mS/cm)	$WP_{4.2}\%$	$FC_{2.5}\%$	Bulk density(g/cm^3)
S1	4.25	3.55	92.20	0.52	0.18	6.97	10.37	1.56
S2	7.24	1.86	90.90	0.84	0.13	7.03	10.87	1.66
S3	3.91	2.58	93.51	0.76	0.12	5.88	9.52	1.68
P1	8.03	1.85	90.11	0.49	0.09	7.00	10.71	1.6
P2	4.84	1.75	93.41	0.68	0.11	5.83	9.41	1.57
P3	7.89	1.75	90.36	0.68	0.11	7.05	10.65	1.62

OM=Organic material; EC=Electrical conductivity; WP=Wilting point; FC=Field capacity

2.4.4. *Field implementation*

Soil moisture measurements make it possible to understand different physical processes such as filling of the total available soil moisture, deep percolation, or surface evaporation. The choice of the location and depth of the sensor depends on the properties of the type of soil and the processes to be monitored, as well as the characteristics of the cropping system. In our study site with a drip-irrigated potato crop, the objectives were twofold: to ensure crop water comfort and to limit deep percolation. To this end, soil moisture was measured at two depths: (i) at a depth of 30cm, at a distance of 15cm from the drip line, and (ii) at a depth of 60cm, directly under the drip line. These measurements provided information on the structure of the water bulb. On the one hand, we considered that "correct" soil moisture at the two locations satisfies crop water comfort and on the other hand, that high soil moisture content at a depth of 60cm – the maximum effective rooting depth – leads to deep percolation. Field monitoring lasted from March 5 to June 15, 2022. Three plots were instrumented with two to three Pilowtech sensors each, corresponding to approximately one sensor/0.1 ha.

To evaluate the quality of the sensors by comparing the data, plots P1 and P2 were equipped with, respectively, a commercial capacitance-based sensor (Drill and Drop manufactured by Sentek Technologies, "SAND" factory default setting) and a tensiometer (Watermark, manufactured by Irrrometer). Measurement depths and positions with respect to the drip line were the same as with the Pilowtech sensors. Time series produced by the commercial capacitance sensor were post-calibrated with respect to the average of the series produced by the Pilowtech (coefficient of 0.621) in order to adapt the measurement of the commercial probe to the local soil type and to allow comparison of the data. Installation of the Pilowtech in the field required the use of a graduated auger and a fence post to attach the acquisition module. The capacitance probe was inserted vertically into the soil after moistening the substrate to guarantee a good contact between the soil and the probe.

3. Results

3.1. Design of the Pilowtech, a decision-support tool for irrigation management

3.1.1. Hardware

The hardware design of the soil moisture sensor is easy and quick to make (about 30 min.). The electrical assembly was simplified in order to be as reproducible as possible (Fig.2). The sensor was configured with two analog inputs for two capacitance probes, thus allowing soil moisture to be measured at two depths at each location. Access to the plug for on-site reading was by means of a screw cap at the above-ground extremity of the PVC tube.

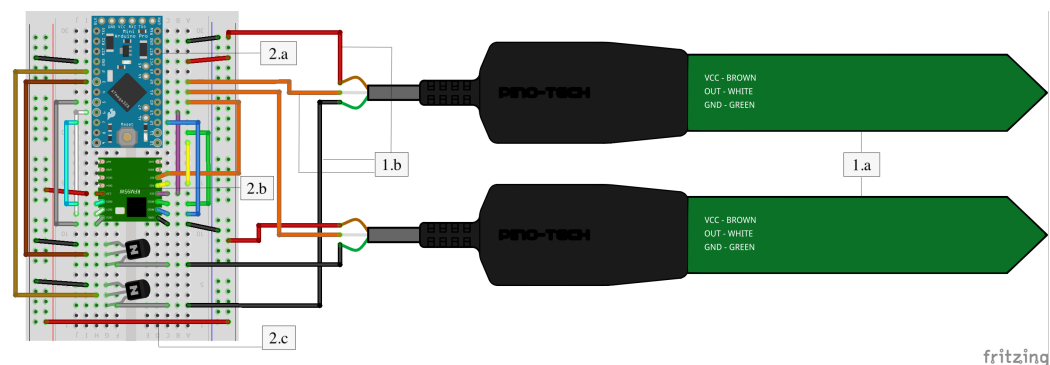


Figure 2: Electrical circuit of the Pilowtech sensor. The numbers refer to Table 4.

3.1.2. Results of calibration

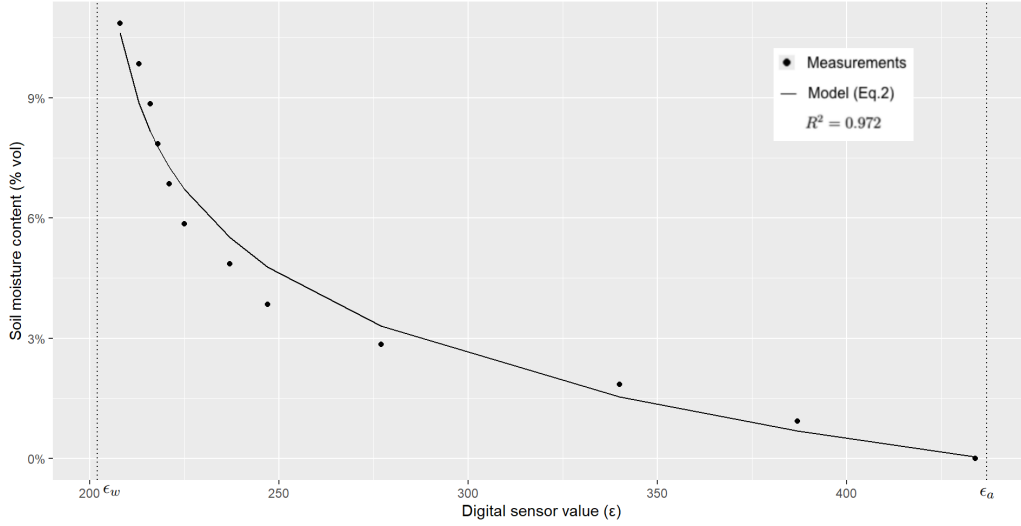


Figure 3: Laboratory calibration of the soil moisture sensor.

The results of the laboratory calibration are presented in figure 3. The digital values returned by the sensor in air and in water were $\epsilon_a = 437$ and $\epsilon_w = 202$, respectively. The sensor displayed a digital value of $\epsilon_s = 434$ in the presence of dry soil ($\theta_v = 0\%$). The curve decreased, reflecting the inverse relationship between moisture content and output voltage: the wetter the soil, the lower the output voltage, and therefore the lower the digital value returned. The distribution of the data shows a linear trend at low soil moisture content and then an increase in the slope above a threshold (around 6% moisture content) suggesting the existence of a vertical asymptote. This type of behavior can be described by an exponential relationship between ϵ and θ . From these results, we constructed the following empirical equation:

$$\theta_v = -\frac{1}{k} \ln\left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_w}{\epsilon_a - \epsilon_w}\right) \quad (2)$$

where k is a parameter depending on soil properties, ϵ_s , ϵ_w and ϵ_a are respectively, the sensor output variable, the sensor constant value in water and the sensor constant value in the air.

Therefore, the expression of volumetric soil moisture can be modeled as a function of the output voltage variable and three parameters depending on the soil type (k) and the probe used (ϵ_w, ϵ_a). This model appears well fitted ($R^2 = 0.972$) with respect to the data obtained from the laboratory calibration (Fig.3). The use of equation (2) assumes the following:

$$\begin{cases} \epsilon_s \in &]\epsilon_w; \epsilon_a] \\ \lim_{\epsilon_s \rightarrow \epsilon_w} \theta_v(\epsilon_s) & = +\infty \\ \epsilon_s = \epsilon_a & \iff \theta_v = 0 \\ \theta_v \sim -\frac{1}{k} \frac{\epsilon_s - \epsilon_w}{\epsilon_a - \epsilon_w} & \text{when } \theta_v \rightarrow 0 \end{cases} \quad (3)$$

The results of the field calibration performed on the soils of the pilot plots are shown in figure 4. For each of the three soil samples (P1, P2, P3), the calibration is made using three different sensors (A, B, C). The results were used to parametrize equation (2), and the corresponding curves (models) were compared with the experimental data. The soil parameter k was determined by searching for an optimal match between the gravimetric and simulated soil moisture and minimisation of the error. Table 3 summarizes the parameters obtained. The results showed that the model based on Eq. (2) satisfactorily fitted the data obtained using the gravimetric method for all three soils ($0.875 \leq R^2 \leq 0.983$). The parameters related to the capacitance probe ranged between 182 and 198 for ϵ_w and between 430 and 479 for ϵ_a . The soil parameters obtained with the same soil sample varied little with respect to their mean ($3\% \leq c_v \leq 4\%$). However, parameter k varied more between the different soil samples ($6\% \leq c_v \leq 10\%$), parameter k is thus more sensitive to soil characteristics.

Table 3: Parameters for 3 different soils (P1, P2, P3) and 3 sensors (A, B, C).

	P1-A	P1-B	P1-C	P2-A	P2-B	P2-C	P3-A	P3-B	P3-C
ϵ_w	198	189	182	198	189	182	198	189	182
ϵ_a	479	438	430	479	438	430	479	438	430
\mathbf{k}	0.293	0.278	0.278	0.242	0.248	0.236	0.279	0.265	0.288
R^2	0.958	0.979	0.983	0.894	0.875	0.879	0.913	0.928	0.958

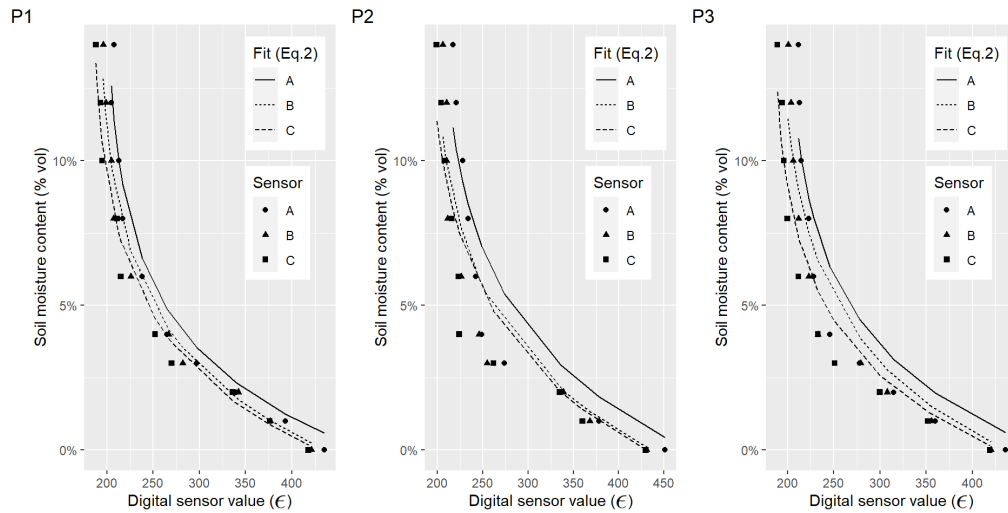


Figure 4: Field calibration of the soil moisture sensor using 3 different soil samples (P1, P2, P3) and sensors (A, B, C).

3.1.3. Software and data reading

Each farmer connected to the WSN has access to a personal space on the online platform. The data produced by the sensors are gathered for each farm and can be displayed according to the desired location, date and depth.

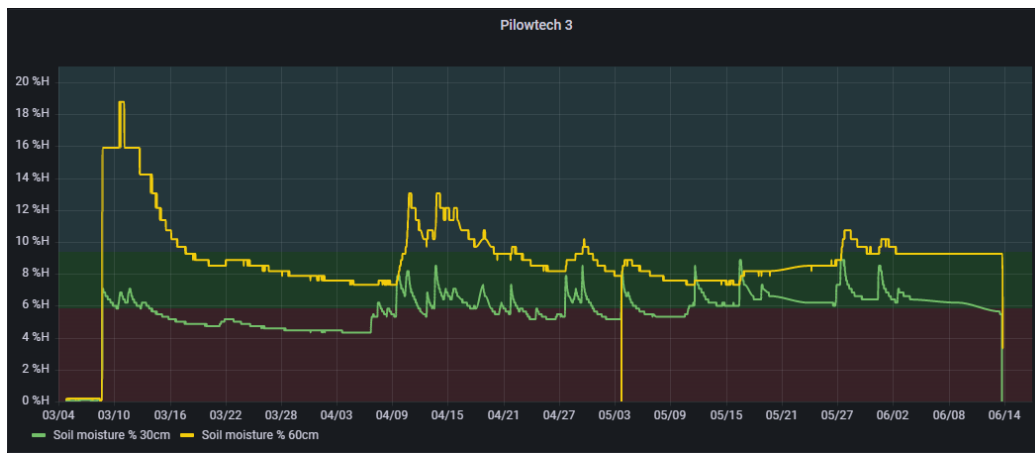


Figure 5: Soil moisture time series as displayed on the online reading platform.

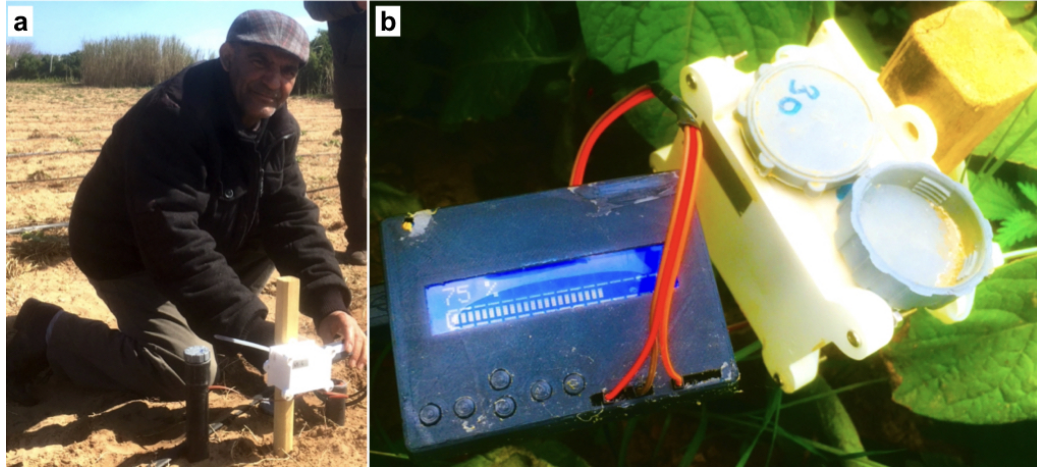


Figure 6: Reading the soil moisture status in the field using the Pilowtech: (a) farmer plugging into the sensor and (b) display showing available water content (%).

The calibration results allow the raw data to be displayed in the form of volumetric soil moisture (Fig.5). Time series are available for consultation (historical and real time) and can be downloaded in different formats. In the field, the data can be accessed manually using the onsite reader. When visiting the plots, by unscrewing the top of the protective PVC tube at the desired location and depth, the farmer can simply plug in (Fig.6.a). After several trials, the farmers indicated the most practical visualization is the one that displays the filling percentage of the total available soil moisture ($FP = \frac{\theta_s - \theta_{wp}}{\theta_{fc} - \theta_{wp}}$). This percentage is visualized by means of a progress bar (Fig. 6.b).

3.2. On field data evaluation: comparison with commercial water sensors

The data series produced by the Pilowtech sensors were compared with series produced by commercial sensors at two locations.

3.2.1. Ability for monitoring relative soil water status

The data obtained for plot P2 were compared with the tension measurement produced by a commercial tensiometer probe (Watermark) at the same location and depths (30 and 60cm) as the Pilowtech (Fig.7). Monitoring continued from March 8 to June 13, 2022, i.e. shortly after planting until the potatoes were harvested. The tensiometers were installed on March 25, before the start of the irrigation season.

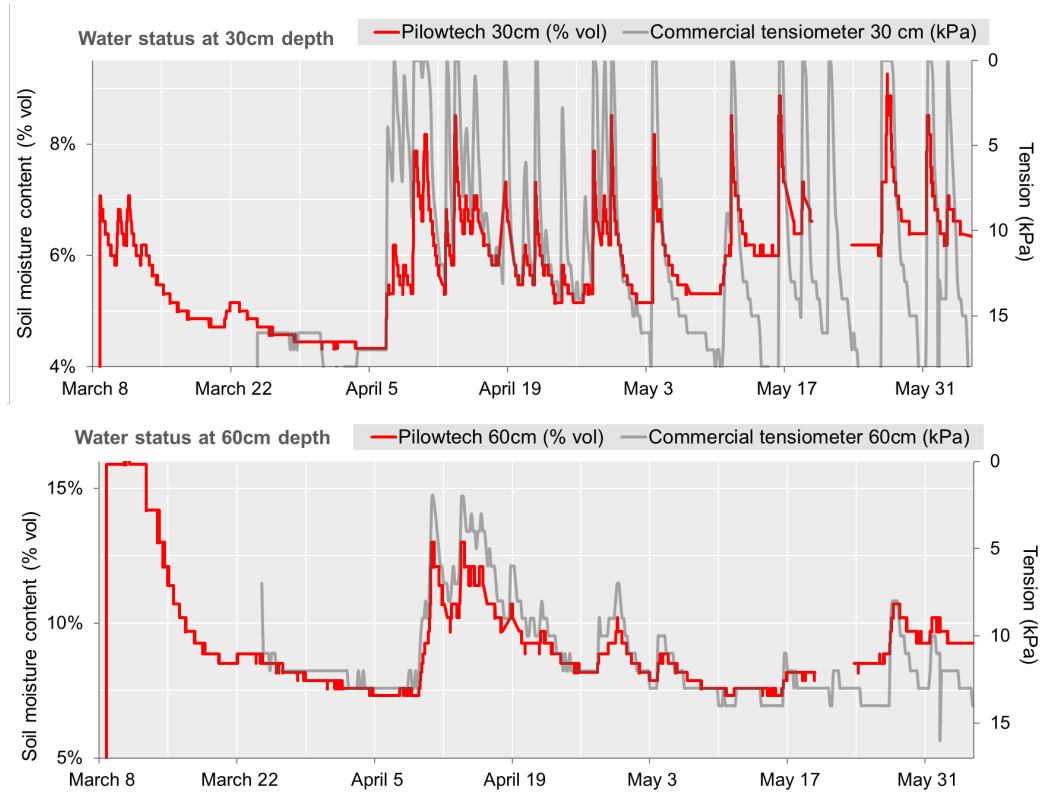


Figure 7: Monitoring of water status in plot "P2": comparison between the Pilowtech (red curves) and a commercial tensiometer sensor (grey curves). The Pilowtech data gap from May 20 to May 23 was due to a power failure, independently from our system.

Irrigation was regular (frequency of around 3 days) during the development stage (April). Irrigation events were less frequent from the mid season until harvest (from May to June). The time step for data generation is 4 hours for the tensiometer and around 5 minutes for the Pilowtech. Irrigation events are clearly identifiable from the peak moisture contents measured by the Pilowtech, and from the drops in tension measured by the tensiometer. At a depth of 30cm, tension varied between 0 and 50 kPa. The volumetric soil moisture measured globally varied between the permanent wilting point ($\theta_{wp} = 5.83\%$ at $pF = 4.2$) and field capacity ($\theta_{fc} = 9.41\%$ at $pF = 2.5$). At a depth of 60cm, the range of soil moisture was slightly higher (between 8% and 13%) and the range of tension was lower (between 2 and 15 kPa). At both depths, the data produced by the commercial tensiometer and the Pilowtech sensor were highly correlated.

In the shallow soil layer, the probes are more sensitive to water inputs. Their variations make it possible to monitor the entire irrigation schedule, and to distinguish between the hydration and drying phases of the soil. Close to the maximum rooting depth, the response of both probes was less sensitive to drip irrigation inputs. Minor non-percolating irrigation events were less or not detected. However, analysis of moisture peaks showed that both probes reacted to irrigation events on the same dates. The sensor thus has the ability to monitor relative changes in soil moisture.

3.2.2. Ability for absolute soil moisture monitoring

In plot P1, the measurements made with a commercial capacitance sensor and the Pilowtech (30 and 60 cm) from April 4 to May 3 were compared (Fig.8). The data generation timestep of the commercial sensor is 1 hour, and around 5 minutes for the Pilowtech. Comparison of the soil moisture content characteristics measured in the plot "P1" ($\theta_{wp} = 7.00\%$ at $PF = 4.2$ and $\theta_{fc} = 10.71\%$ at $PF = 2.5$) showed that the range of moisture content measured by the commercial probe and by Pilowtech was globally bounded by the permanent wilting point and field capacity.

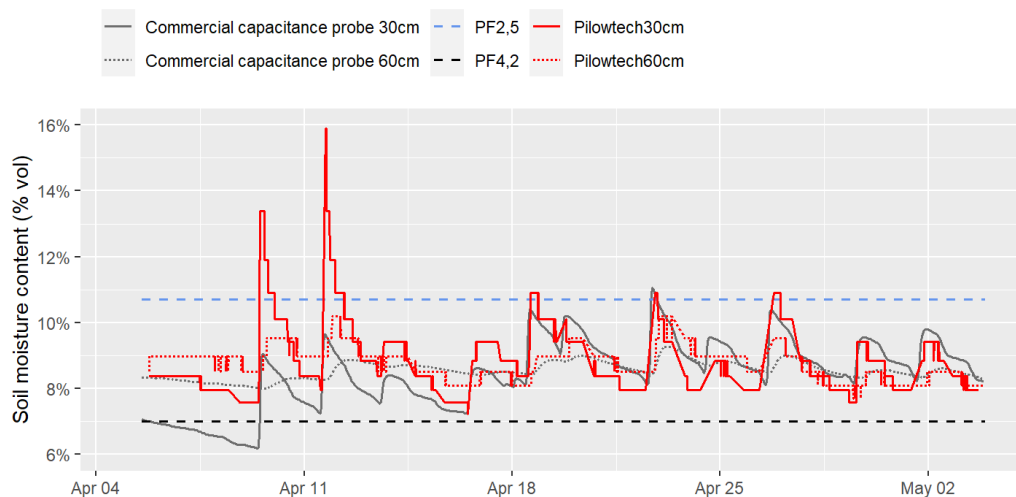


Figure 8: Monitoring soil moisture content in plot "P1": comparison of the Pilowtech (red curves) and a commercial capacitance sensor (grey curves).

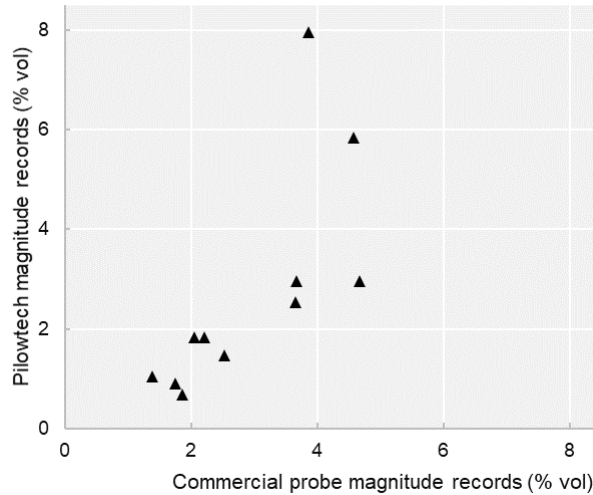


Figure 9: Monitoring soil moisture content in plot "P1": comparison of the magnitude of changes in soil moisture recorded by the Pilowtech and a commercial capacitance sensor.

We also compared the potential of detection of irrigation peaks, corresponding to local maximum soil water moisture content. Results revealed an excellent temporal match, confirming that irrigation events were accurately detected by both sensors. The ability of the Pilowtech to measure the intensity of irrigation events was further analyzed by comparing the magnitude of changes in soil moisture recorded by both probes during the first month of monitoring (Fig.9). The magnitude of an event was calculated as the difference between the maximum peak moisture measured following an irrigation event and the minimum moisture value preceding the same irrigation event. The results showed a good correlation between the magnitudes recorded by the two probes for low and medium intensity events ($\Delta < 4\%$). On the other hand, the gap between measurements by the two probes was larger in the case of more intense, higher magnitude events ($\Delta > 4\%$). Under these conditions, the Pilowtech sensor gave higher amplitudes than those measured by the commercial probe. This difference could be explained by the different sampling intervals used in sandy soils with high hydraulic conductivity. These behavioral variations could also be the result of drift trends the experimental data did not allow us to characterise.

3.3. Provisioning and maintenance

3.3.1. A low tech sensor with reasonable maintenance requirements

The system was designed to be low power and to enable several months autonomy with a 3.7V battery. The main maintenance tasks during the season were: (i) battery management; (ii) network troubleshooting; (iii) hardware maintenance. At the end of the 102-day monitoring period, one sensor out of the eight installed needed its battery recharging. The first assumption made in the event of a gap in the data time series is that the battery is empty. After checking the voltage, the second hypothesis is a network failure. A few occasional network interruptions required maintenance tasks over the course of the season, the origins of which were identified as follows: power supply failure at the gateway or an interruption in Wi-Fi coverage at the gateway location. Finally, once the network and the power supply have been checked, a gap or an anomaly in the data time series may be due to hardware failure. The connectors in the acquisition module and at the junction with the probes should then be checked. Direct reading in the field may be necessary to check the quality of the data provided by the probe. Out of the 16 probes installed (2 per sensor), 25% of the probes showed occasional anomalies that required a technical intervention. In these situations, the probes produced unstable and inconsistent data in the data series that were easy to identify. As these events occurred following irrigation events, we assume they were due to faulty seals resulting in leakage into the probe's electronic circuits. In this case, technical maintenance consists in removing the damaged probe, and drying or replacing it, and making sure it is watertight. The resulting anomalies in soil moisture data time series can also be easily cleaned.

3.4. A low-cost sensor with adjustable costs

Table 4 summarizes the costs required to design a low tech soil moisture sensor. The cost of production is adjustable depending on requirements. The components needed for the sensor itself cost less than 10€ with an onsite reading system only, less than 15€ for a wireless sensor, and a total of slightly more than 20€ for the sensor with a double data reading mode. For the wireless solution, setting up a LoRa network requires a gateway (costing between 50€ and 300€) and an Internet connection. However, this investment is sufficient to network an unlimited number of sensors, which allows the costs to be amortized or shared between users. The low cost hardware and free software of the Pilowtech thus make the sensor highly affordable.

Table 4: Low-tech soil moisture sensor cost table.

S.N	Component	Cost (€)
1.	Capacitance probes	
a.	Capacitance soil moisture sensor v1.2 x2	1.56
b.	Dupont wires 30cm x5	0.5
	Subtotal capacitance probes	2.06
3.	Onsite data reader	
a.	Arduino Uno R3	3.36
b.	Shield Arduino LCD	3.91
	Subtotal onsite reading double depth sensor	9.33
2.	Acquisition module	
a.	Arduino pro mini 3.3V	3.35
b.	LoRa microchip SX1276	4.10
c.	Small connectors	2.00
d.	Li-ion 18650 rechargeable battery	1.83
e.	18650 battery slot	0.3
	Subtotal wireless double depth sensor	13.64
	Total online & onsite reading sensor	20.91

4. Discussion

Has irrigation monitoring using soil moisture probes become accessible to any water user? We developed a soil moisture sensor based on the specifications and feedback provided by the water users of an irrigation scheme. The sensor we developed is (i) low tech, meaning easy to make, maintain and reproduce; (ii) low cost, so small farming systems can afford it; (iii) low power, and consequently relatively self-sufficient and sustainable over time; (iv) meeting farmers' expectations for monitoring water status in the root zone. The data can be accessed in two ways: remotely via an online interface, or in the field through direct reading. Calibration is feasible both in the laboratory and in the field. The sensor rating curve (Eq.2) is given by only one parameter, k , characteristic of the soil. This rating equation provides a reliable prediction of volumetric soil moisture once it has been parameterized. The sensor allows soil moisture to be monitored at two depths and can be used as a decision support tool for irrigation scheduling. Comparison with commercial probes highlighted the good performance of the Pilowtech sensor for irrigation scheduling and for monitoring relative soil moisture.

The low recording frequency of the commercial tensiometer, capillary hysteresis processes and the low water holding capacities of the soils prevented accurate plotting of sandy soil retention curves [28]. To go further, a laboratory experiment conditions would allow comparison of the Pilowtech sensor results with the predictions of the Van Genuchten function for a sandy soil [29]. The measurement of absolute soil moisture was satisfactory compared with that of the commercial capacitance probe, but the measurement may be subject to slight deviation over time. A metrological study, specific to the monitoring of the deviation by multiplying the controls and measuring battery discharge rates, should enable conclusions to be drawn concerning these effects. At the level of the farm or of the irrigation scheme, the number of sensors could be multiplied to create a wireless sensor network based on the LoRaWAN protocol. The data produced in real-time can be used by different types of stakeholders: (i) by farmers as a decision-support tool at the field and farm levels; (ii) by irrigation scheme managers and agricultural advisors to assess water requirements and advise water users; (iii) by researchers, for whom the production of these data will help assess performance gaps, compare practices and feed model scenarios.

Recent advances in on-board electronics and IoT therefore appear promising for the agricultural sector and particularly for water management, to the extent that they led to the development of both economically and technically accessible measurement tools. The plasticity of these systems is particularly interesting because it makes the tool adaptable to the agrarian context: for instance, we were able to adapt the data reading system to the users. Moreover, the open source nature of the system transforms the traditionally "black box" sensor into a tool that can be fully programmed by the user. Thus the user can calibrate the Pilowtech according to the characteristics of his/her field, which makes it better suited and therefore more reliable than a default pre-calibrated probe. On the other hand, it is important to stress that these advantages are not necessarily considered as such by every farmer. Indeed, the "do it yourself" approach may be seen as a limitation as it requires time to get used to it, more regular maintenance, and a certain level of agronomic expertise. These limitations can be overcome by supporting users, notably through training or by providing technical support. The scale of the irrigation scheme, and user collectives such as water users associations, appear to be a suitable environment to host a Fab lab, making it possible to pool maintenance interventions and the expenses involved in running wireless sensor networks.

The Fab Lab also appears as a valuable environment for user training, notably regarding the calibration process, which although not requiring any special equipment, may nevertheless demand some ability. Another alternative could be for further studies to produce tables associating parameter values with major soil types.

Currently, the use of these technologies is facilitated by the growing importance of the community involved in this domain, the multiplication of suppliers worldwide, and the trend towards simplification of components and reduction of their costs. However, component costs still depend on the market, and are consequently sensitive to fluctuations (the Covid-19 pandemic, for example, led to a worldwide shortage of electronic chips). Hence, the equipment used in the present study will inevitably evolve with technical advances and market changes, which is not a problem as long as the equipment remains highly affordable and available from local suppliers. In any case, the Pilowtech sensor was designed as an evolving tool, necessarily subject to change through re-design and "bricolage", as signs of its re-appropriation by users [30]. Future studies should focus on the multi-criteria (agronomic, environmental, hydraulic, socio-economic) impacts of the adoption of such tools for irrigated agriculture, including paying attention to potential side effects [31, 32], and on ways to promote its dissemination among water users. After all, there is nothing to prevent the adjustment of this sensor to a variety of contexts, for irrigation management of diverse cropping systems or for environmental monitoring, at the same time bearing in mind that "not everything that can be counted actually counts".

5. Conclusion

The use of new technologies for agriculture does not necessarily need to be expensive, complex and energy intensive. We designed a low-cost, open source, low-tech and low-energy soil moisture sensor for monitoring crop irrigation. The calibration method implemented is simple, based on only one parameter, and allows real time monitoring of the fulfilment of the water requirements of an irrigated crop, in the present case, potato. The irrigation schedule can therefore be adjusted accordingly. Comparison of our low-cost sensor with commercial probes in field conditions over a whole irrigation season underlined the good performance of the Pilowtech sensor. The sensor can be used as a decision-support tool for real-time water management.

At the scale of an irrigation scheme, the skills and costs of the equipment required to build a wireless sensor network could be shared between users. Soil moisture probes are known as a driver to achieve water savings, and this study provides a way to make them accessible, although they require more regular maintenance than existing commercial ready-to-use solutions. We believe that this study contributes to the democratization of the use of new technologies in agriculture and provides keys to facilitating their adoption, in both the North and the global South. Future work should focus on assessing the impacts of the adoption of such innovation, and its adaptation to different contexts.

Acknowledgements

This paper is part of the first author's PhD project, funded by the CIRAD and the Occitanie Region (France). The work was carried out as part of the HubIS project (EU's PRIMA programme 2019, grant ANR-19-P026-0006-02). We are grateful to the CTV Haouaria and GDA Echraf for participating in the project. The cooperation of the farmers in the Echraf irrigation scheme was greatly appreciated.

Research data

All the software required for the design of the low-cost soil moisture sensor is available from the Mendeley Data repository.

1. Upload "Pilowtech sx1276 arduino" file on Arduino IDE, fill in your sensor information and upload it on your Arduino Pro Mini microcontroller.
2. Upload "Onsite reader arduino" file on the Arduino Uno and fill in your calibration parameters for onsite data reading.
3. Upload the "3D package" file to a 3D printer to get your sensor packaging.
4. Upload the "Nodered dataflow" file to Node-RED and adapt it to your data flow to get your sensor network ready!

References

- [1] A. Toreti, D. Bavera, J. Acosta Navarro, C. Cammalleri, A. de Jager, C. Di Ciollo, A. Hrast Essenfelder, W. Maetens, D. Magni, D. Masante, M. Mazzeschi, S. Niemeyer, J. Spinoni, Drought in europe august 2022 (2022). doi:10.2760/264241.
- [2] B. Baruth, S. Bassu, W. Ben Aoun, I. Biavetti, M. Bratu, I. Cer-rani, Y. Chemin, M. Claverie, P. De Palma, D. Fumagalli, G. Manfron, J. Morel, L. Nisini Scacchiafichi, L. Panarello, G. Ronchetti, L. Seguini, E. Tarnavsky, M. Van Den Berg, Z. Zajac, A. Zucchini, Jrc mars bulletin - crop monitoring in europe 30 (8) (2022). doi:10.2760/31930.
- [3] E. Ali, W. Cramer, J. Carnicer, E. Georgopoulou, N. Hilmi, G. L. Cozan-net, P. Lionello, Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region, in: Cli-mate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, cambridge university press Edition, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022, pp. 2233–2272. doi:10.1017/9781009325844.021.
- [4] S. Döring, Come rain, or come wells: How access to groundwater affects communal violence, *Political Geography* 76 (2020) 102073. doi:https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2019.102073.
- [5] S. O. Ihuoma, C. A. Madramootoo, Recent advances in crop water stress detection, *Computers and Electronics in Agriculture* 141 (2017) 267–275. doi:10.1016/j.compag.2017.07.026.
- [6] J. Zinkernagel, J. F. Maestre-Valero, S. Y. Seresti, D. S. Intrigliolo, New technologies and practical approaches to improve irrigation man-agement of open field vegetable crops, *Agricultural Water Management* 242 (2020) 106404. doi:10.1016/j.agwat.2020.106404.
- [7] K. X. Soulis, S. Elmaloglou, N. Dercas, Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip ir-rigation scheduling systems, *Agricultural Water Management* 148 (2015) 258–268. doi:10.1016/j.agwat.2014.10.015.

- [8] C. Serra-Wittling, B. Molle, B. Cheviron, Plot level assessment of irrigation water savings due to the shift from sprinkler to localized irrigation systems or to the use of soil hydric status probes. Application in the French context, *Agricultural Water Management* 223 (2019) 105682. doi:10.1016/j.agwat.2019.06.017.
- [9] P. Dobriyal, A. Qureshi, R. Badola, S. A. Hussain, A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management, *Journal of Hydrology* 458-459 (2012) 110–117. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021.
- [10] N. Lachia, L. Pichon, P. Marcq, J. Taylor, B. Tisseyre, Why are yield sensors seldom used by farmers – a french case study, *Precision agriculture '21* (2021) 745–751doi:10.3920/978-90-8686-916-9_89.
- [11] F. Abebe, A. Zuo, S. A. Wheeler, H. Bjornlund, A. van Rooyen, J. Pittock, M. Mdemu, M. Chilundo, Irrigators' willingness to pay for the adoption of soil moisture monitoring tools in south-eastern africa, *International Journal of Water Resources Development* 36 (sup1) (2020) S246–S267. doi:10.1080/07900627.2020.1755956.
- [12] OCDE, *Digital Opportunities for Better Agricultural Policies*, 2019. doi:10.1787/571a0812-en.
- [13] L. Hamami, B. Nassereddine, Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review, *Computers and Electronics in Agriculture* 179 (2020) 105782. doi:10.1016/j.compag.2020.105782.
- [14] E. A. Abioye, M. S. Z. Abidin, M. S. A. Mahmud, S. Buyamin, M. H. I. Ishak, M. K. I. A. Rahman, A. O. Otuoze, P. Onotu, M. S. A. Ramli, A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation, *Computers and Electronics in Agriculture* 173 (2020) 105441. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441.
- [15] H. Zhang, L. He, F. D. Gioia, D. Choi, A. Elia, P. Heinemann, Lo-RaWAN based internet of things (IoT) system for precision irrigation in plasticulture fresh-market tomato, *Smart Agricultural Technology* 2 (2022) 100053. doi:https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100053.

- [16] R. Liao, S. Zhang, X. Zhang, M. Wang, H. Wu, L. Zhangzhong, Development of smart irrigation systems based on real-time soil moisture data in a greenhouse: Proof of concept, *Agricultural Water Management* 245 (2021) 106632. doi:10.1016/j.agwat.2020.106632.
- [17] E. Bwambale, F. K. Abagale, G. K. Anornu, Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review, *Agricultural Water Management* 260 (2022) 107324. doi:10.1016/j.agwat.2021.107324.
- [18] M. Pramanik, M. Khanna, M. Singh, D. Singh, S. Sudhishri, A. Bhatia, R. Ranjan, Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system, *Smart Agricultural Technology* 2 (2022) 100032. doi:https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100032.
- [19] P. Placidi, L. Gasperini, A. Grassi, M. Cecconi, A. Scorzoni, Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks, *Sensors* 20 (12) (2020) 3585. doi:10.3390/s20123585.
- [20] S. Adla, N. K. Rai, S. H. Karumanchi, S. Tripathi, M. Disse, S. Pande, Laboratory Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Capacitive and Very Low-Cost Resistive Soil Moisture Sensors, *Sensors* 20 (2) (2020) 363. doi:10.3390/s20020363.
- [21] P. Vandôme, G. Belaud, C. Leauthaud, S. Moinard, I. Mekki, A. Zairi, F. Charron, J. Leconte, I. Ferchichi, T. Ajmi, Exploring ways to improve agricultural water management on two Mediterranean irrigated systems : promises of wireless low-tech sensor networks (2022). doi:10.5194/iah2022-90.
- [22] H. Klaina, I. P. Guembe, P. Lopez-Iturri, M. Campo-Bescós, L. Azpilicueta, O. Aghzout, A. V. Alejos, F. Falcone, Analysis of low power wide area network wireless technologies in smart agriculture for large-scale farm monitoring and tractor communications, *Measurement* 187 (2022) 110231. doi:10.1016/j.measurement.2021.110231.
- [23] W. Tao, L. Zhao, G. Wang, R. Liang, Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges, *Computers and Electronics in Agriculture* 189 (2021) 106352. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106352.

- [24] The things network (2022).
URL <https://www.thethingsnetwork.org/>
- [25] O. F. . Contributors, Node-red (2022).
URL <https://nodered.org>
- [26] Influxdb (2022).
URL <https://www.influxdata.com/>
- [27] Grafana Labs, Grafana documentation (2018).
URL <https://grafana.com/docs/>
- [28] K. T. Morgan, L. R. Parsons, T. Adair Wheaton, Comparison of laboratory- and field-derived soil water retention curves for a fine sand soil using tensiometric, resistance and capacitance methods, *Plant and Soil* 234 (2) (2001) 153–157. doi:10.1023/A:1017915114685.
- [29] B. Ghanbarian-Alavijeh, A. Liaghat, G.-H. Huang, M. T. Van Genuchten, Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data, *Pedosphere* 20 (4) (2010) 456–465. doi:10.1016/S1002-0160(10)60035-5.
- [30] M. Benouniche, M. Zwarteveen, M. Kuper, Bricolage as innovation: opening the black box of drip irrigation systems, *Irrigation and Drainage* 63 (5) (2014) 651–658. doi:10.1002/ird.1854.
- [31] J. Berbel, L. Mateos, Does investment in irrigation technology necessarily generate rebound effects? A simulation analysis based on an agro-economic model, *Agricultural Systems* 128 (2014) 25–34. doi:10.1016/j.agsy.2014.04.002.
- [32] R. Q. Grafton, J. Williams, C. J. Perry, F. Molle, C. Ringler, P. Steduto, B. Udall, S. A. Wheeler, Y. Wang, D. Garrick, R. G. Allen, The paradox of irrigation efficiency, *Science* 361 (6404) (2018) 748–750. doi:10.1126/science.aat9314.

3.4 Un système d'automatisation à bas coût pour la gestion de l'irrigation gravitaire

3.4.1 Contexte et objectifs

La conception du *WatAr*, capteur de détection d'eau à bas coût (section 3.2) représente une première avancée dans la recherche d'innovation pour l'amélioration des performances de l'irrigation gravitaire. Pour autant, le capteur ne répond pas à la totalité des attentes des usagers du Water User Fab Lab (WFL) de la Crau dans la mesure où son usage réduit la charge mentale et allège le temps de travail en limitant les aller-retours à la parcelle, mais ne règle pas la problématique de l'indisponibilité de l'agriculteur au moment de la réception de l'alerte. L'agriculteur peut en effet être mobilisé sur d'autres activités, et la contrainte des tours d'eau de nuit et jours chômés n'est pas levée. A cette contrainte sociale s'ajoutent les écarts à la performance hydraulique pouvant en découler, un simple retard de quinze minutes à l'opération d'une vanne pouvant représenter un volume excédentaire potentiel de 150 m^3 à plein débit. La recherche de solutions pour l'automatisme des vannes d'irrigation n'est pas nouvelle. Les dernières années ont vu les initiatives se multiplier sur le territoire de la Crau, dans les mains de la recherche publique, d'entreprises privées, ou des agriculteurs les plus bricoleurs (Moebs, 2018). Ce constat souligne l'importance du besoin pour cette technologie, et la grande capacité d'innovation des agriculteurs de Crau. Pour autant, les innovations existantes restent peu adoptées en pratique et la majorité des exploitations ne dispose pas d'automatismes pour la gestion de l'eau, à l'échelle du territoire étudié comme à l'échelle mondiale. L'objectif de ce travail est donc de concevoir un système d'automatisation de l'irrigation gravitaire accessible techniquement et économiquement. Afin de répondre à ces enjeux, nous avons travaillé au développement d'un système d'automatisation des vannes d'irrigation, accessible techniquement et économiquement selon le besoin amont exprimé par le WFL de la Crau. Ces travaux, proposés sous la forme de résultats complémentaires, ont vocation à être publiés en complément à la section 3.2.

3.4.2 Résultats

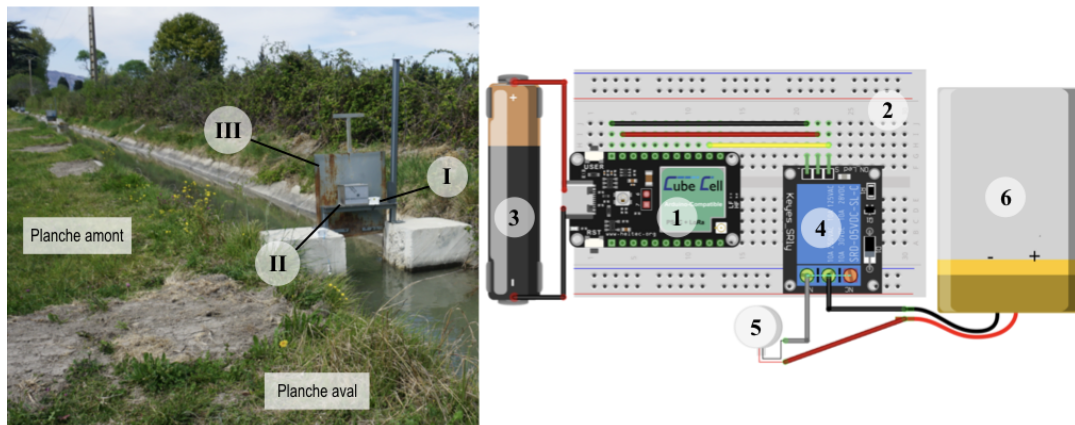
Les échanges avec les agriculteurs ont mené à l'élaboration d'un cahier des charges pour le développement d'une vanne d'irrigation automatique (Table 3.1). La recherche de compromis entre efficacité, robustesse et simplicité qui s'est dégagée des attentes des acteurs a guidé les choix techniques au cours du processus. Le choix d'une activation de la vanne par le biais d'un électro-aimant a été retenu pour avoir déjà fait ses preuves chez certains agriculteurs et montré une bonne résistance aux conditions extérieures pouvant affecter le dispositif. En revanche, les membres du Fab Lab ont exprimé le besoin d'un déclenchement de l'automatisme basé sur l'avancée de la lame d'eau sur la parcelle, plutôt qu'un système de minuterie comme le proposaient les systèmes déjà existants. En effet, les durées d'irrigation n'étant pas constantes et difficilement prévisibles en raison de la variabilité des débits, des caractéristiques parcellaires, de l'humidité initiale ou des densités de végétation, les systèmes à minuterie peuvent facilement mener à des sur-irrigations ou sous-irrigations. Le pilotage par détection de la lame d'eau en bout de parcelle étant rendu possible par le développement préalable du capteur *WatAr* (chapitre 3.1), nous proposons d'intégrer cette donnée au système d'automatisme. Les usagers ont également exprimé la nécessité d'un contrôle humain dans la prise de décision d'actionner la vanne.

TABLE 3.1 – Cahier des charges établi par le Fab Lab d'usagers de l'eau de la Crau pour le développement d'une vanne d'irrigation automatique

Besoins et attentes des acteurs	Réponse pratique
Opération automatique de la vanne	Activation électromagnétique
Pilotage par détection de la lame d'eau au champ	Couplage avec capteur <i>WatAr</i>
Contrôle usager à distance	Interfaçage smartphone
Accessibilité économique	Hardware à bas coût/Software gratuit
Facilité de fabrication et de maintenance	Low-tech et open source
Autonomie énergétique	Basse consommation
Adaptabilité à la diversité des vannes existantes	Système modulable

La prise en compte de cette demande s'est traduite au niveau du software et de l'interfaçage par : i) la réception de données de contrôle pour vérifier la bonne opération de la vanne et ii) la possibilité d'actionner "manuellement" la vanne à distance sur smartphone, sans dépendre de l'activation du capteur au champ. Enfin, le dernier défi technique a consisté à développer un système adaptable à la grande diversité des vannes existantes au sein des exploitations. De fait, les vannes employées pour la gestion des canaux tertiaires et inférieurs rassemblées sous l'appellation de martelières sont des vannes plates métalliques dont les propriétés géométriques et les modalités d'opération (ouvrante ou fermante, à glissière ou à charnières etc.) varient fortement. Nous avons par conséquent cherché à développer un système modulable, assez flexible pour être adapté aux différents types de martelières.

Le premier prototype a été conçu pour une martelière à glissière descendante : le ré-armement entre les tours d'eau se fait en position haute-ouverte, l'opération réalisée par l'irrigant durant le tour d'eau consiste à fermer la vanne pour irriguer la planche en amont. Le système d'automatisme *Lancelot* est composé d'un boîtier d'accrochage et d'un module d'acquisition de données (Fig.3.1). Le principe de fonctionnement est le suivant : la martelière est maintenue en position ouverte en reposant sur un dispositif d'accrochage. Un axe rotatif permet au dispositif d'accrochage de pivoter pour soutenir ou libérer la martelière. Un électro-aimant permanent interdit la rotation de l'axe, ce qui assure le maintien de la martelière. L'application d'un courant électrique dans une bobine permet de désactiver temporairement l'aimant, qui libère le dispositif d'accrochage et enclenche donc la fermeture de la martelière guillotine. L'application de ce courant est conditionnée par le module de pilotage, qui comprend le micro-contrôleur et un relais électrique.



Id	Modèle	Fonction	Fournisseur	Coût
1	Cubecell HTCAB01	Microcontrôleur & module LoRa	Heltec, China	11.43€
2	Breadboard	Connectique	HMTI, China	1.61€
3	LiPo Battery	Alimentation microcontrôleur	DaweiKala, China	2.70€
I			<i>Sous total module de pilotage</i>	15.74€
4	Relais 5VDC KY-019	Relais	Songle, China	1.79€
5	ITS-PE-5029-12VDC	Electroaimant à désactivation	Conrad, Germany	61.19€
6	VRLA AGM 12V 4.5ah	Batterie 12V aimant	Lucas	9.00€
7	Petite mécanique	Dispositif d'accrochage	Misumi	18.59€
II			<i>Sous total dispositif d'accrochage</i>	90.57€
			<i>Total système Lancelot</i>	106.31 €

FIGURE 3.1 – Description, coûts et composants du système d'automatisme Lancelot : module de pilotage (I), dispositif d'accrochage (II), vanne martelière (III).

L'architecture software pour le pilotage de l'automatisme est présentée figure 3.2. Comme pour le système *WatAr*, les données transitent localement via le réseau LoRa puis sont redirigées sur internet pour être stockées, visualisées et analysées. La particularité du système *Lancelot* est que le micro-contrôleur est programmé en mode "récepteur" (downlink) : le capteur s'éveille toutes les trois minutes et vérifie les données reçues. L'émission de la donnée pour l'activation de la vanne peut être commandée au choix par l'agriculteur, via l'application de messagerie Telegram, ou automatiquement suite à la détection d'eau par le capteur *WatAr* à l'aval de la parcelle.

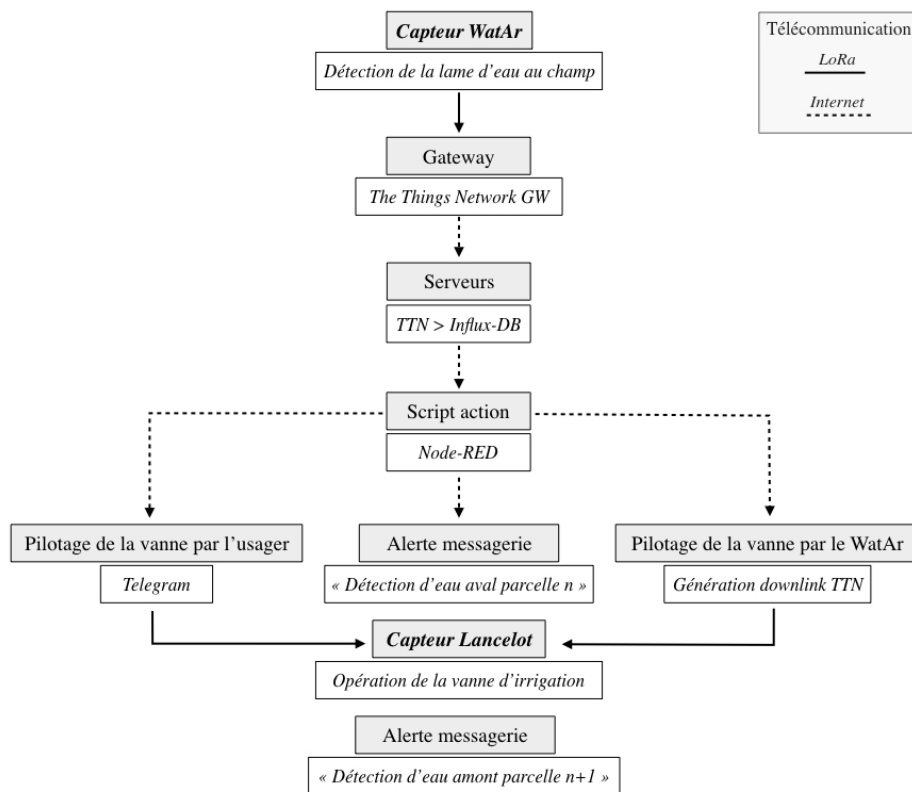


FIGURE 3.2 – Architecture de la communication des données pour le système d'automatisation de vanne d'irrigation Lancelot.

3.4.3 Expérimentations au champ et perspectives

Depuis Avril 2023, le Domaine du Merle est équipé de six prototypes de martelières automatiques *Lancelot*. L'instrumentation a été réalisée en série sur sept planches d'irrigation consécutives afin d'expérimenter la complète automatisation de l'irrigation d'un petit secteur d'une dizaine d'hectares. Pour cette première saison d'essai, le mode de pilotage avec prise de décision finale par l'agriculteur est privilégié (figure 3.3).



FIGURE 3.3 – Expérimentation de l'automatisation des vannes d'irrigation gravitaire par le système Lancelot : pilotage au smartphone par l'utilisateur.

Nous avons répondu au cahier des charges mis en place avec les agriculteurs en développant un système d'automatisation de vanne d'irrigation gravitaire adapté aux besoins du territoire. L'innovation se distingue des prototypes précédents en permettant le pilotage de la vanne à distance, par décision de l'utilisateur depuis un smartphone ou un ordinateur, ou directement par détection de la lame d'eau à l'aval de la parcelle. La conception du *Lancelot* est simple et ne demande pas de

matériel de pointe. L'ensemble des composants du système *Lancelot* représente un investissement d'une centaine d'euros par vanne à automatiser. Au total, l'automatisation d'une planche d'irrigation reposant sur le couplage du *Lancelot* avec un capteur *WatAr* représente un investissement d'environ 125 *euros.ha⁻¹*. Le software pour la programmation du module de pilotage et de l'acquisition des données est gratuit et open source. Le dispositif d'accrochage représente le plus gros poste de dépense et la partie la plus technique de la conception, mais a été réalisé en partenariat avec l'équipe d'un centre de formation de la région (BTS conception et réalisation de systèmes automatiques, Lycée Pasquet, Arles), qui pourrait par conséquent apporter un soutien technique ou de conseil pour la diffusion de l'innovation au sein du territoire.

Le retour d'expérience des usagers et le suivi des installations devraient permettre d'évaluer les performances de l'innovation en fin de saison et d'améliorer le prototype si besoin. Notamment, les durées de vie avant recharge des batteries pour l'alimentation de l'aimant et du module de pilotage, qui vont dépendre des modalités d'usage au quotidien (armement des martelières la veille ou le jour même par exemple), restent à étudier.

Pour dépasser le stade du prototype, le système *Lancelot* aura besoin d'être éprouvé dans le temps vis à vis de sa fiabilité, de sa robustesse et de ses éventuels besoins en maintenance. Par ailleurs, le système a été conçu pour être modulable, et des essais pour l'adapter à d'autres types de vannes (ouvrante à charnières par exemple) devront être menés.

Finalement, le développement de cette innovation introduit de nouvelles questions de recherche autour des performances de l'irrigation de surface. Aux échelles de la parcelle et de l'exploitation agricole, dans quelle mesure l'adoption de cette technologie transformerait-elle les pratiques d'irrigation ? Et avec quels impacts sur les conditions de travail des irrigants, sur les volumes appliqués et la répartition des flux d'eau ? A plus large échelle, quel est le potentiel d'adoption de cette innovation ? Et avec quels effets sur les dynamiques socio-hydrologiques des territoires : viabilité des systèmes de production, recharge de l'aquifère ?

Chapitre 4

Adoption des nouvelles technologies : perspectives et impacts sur les performances des systèmes irrigués

Table des matières

4.1	Introduction du Chapitre 4	137
4.2	Adoption et diffusion des low-techs : réflexions tirées de l'étude de deux territoires irrigués méditerranéens	139
4.2.1	Water User Fab Labs, vitrines de l'innovation?	139
4.2.2	Potentiel d'adoption de la low-tech numérique pour l'agriculture, éclairages de la plaine irriguée d'El Haouaria	141
4.2.3	Freins, moteurs et glissement des limites à l'adoption des nouvelles technologies	145
4.2.4	Ateliers de conception, arme de diffusion massive	147

4.3	Article IV - Revisiting border irrigation management : benefits of new in-field sensor-based control compared to conventionnal cutoff times	152
4.3.1	Résumé	152
4.3.2	Introduction	155
4.3.3	Materials and methods	158
4.3.4	Results	167
4.3.5	Discussion	171
4.3.6	Conclusion	174
4.4	Automatisation de l'irrigation gravitaire d'un petit périmètre irrigué : à qui profite le "clac" ?	179
4.4.1	Contexte et objectifs	179
4.4.2	Matériel et méthode	180
4.4.3	Résultats	187
4.4.4	Discussion	190

4.1 Introduction du Chapitre 4

La fondation et l'animation des Water user Fab Labs, décrite dans le Chapitre 2, a constitué un terreau fertile pour la co-conception d'innovations adaptées aux besoins et contraintes spécifiques aux territoires irrigués. Les technologies développées, décrites dans le Chapitre 3, ont été expérimentées en conditions réelles, avec les agriculteurs sur le terrain. Au cours de la saison d'irrigation, cet environnement a permis d'étudier les caractéristiques météorologiques de ces réseaux de capteurs connectés à bas coût, d'en évaluer la robustesse, et l'aptitude à répondre aux enjeux préalablement identifiés par le collectif. Sur les deux rives de la méditerranée, les échanges entre chercheurs et agriculteurs ont contribué - et contribuent toujours - à l'amélioration continue des innovations, pour en faire des outils fonctionnels, pratiques pour l'utilisateur et intégrés aux systèmes de culture.

Ces résultats amènent par conséquent à s'interroger sur l'adoption de ces nouvelles technologies à plus grande échelle. Comment, au delà des Water user Fab Labs, favoriser la diffusion des innovations ? Quel est le potentiel d'adoption de ces nouveaux outils ? Et dans quelle mesure une approche participative et low-tech peut-elle bousculer les barrières à l'adoption des technologies numériques pour l'agriculture habituellement constatées ? Les processus d'adoption et de diffusion de l'innovation s'inscrivent dans des dynamiques temporelles longues, et sont par conséquent difficiles à étudier au terme d'un projet qui les a vu naître. Aussi nous proposons d'apporter quelques premiers éléments de réponse à ces questions, sur la base de réflexions tirées de l'étude des deux territoires irrigués.

En outre, l'éventuelle adoption massive de systèmes de mesure et d'outils d'aide à la décision pour la gestion de l'eau agricole implique nécessairement de s'interroger sur les potentiels impacts de cette adoption. Comment évaluer, dans le temps et dans l'espace, les changements de performance des systèmes irrigués induits par l'adoption de ces nouvelles technologies ? Dans quelle mesure l'usage de ces technologies peut-il être optimisé pour répondre à des objectifs

de performance? Enfin, comment se prémunir des hypothétiques effets indésirables dérivant de ces nouvelles pratiques? Nous étudierons, à travers l'exemple des technologies développées dans le cadre du Fab Lab de la Crau, le potentiel d'un nouveau modèle numérique pour simuler les dynamiques temporelles des performances de l'irrigation gravitaire et optimiser les pratiques associées à l'usage des innovations. Finalement, nous chercherons à mettre en lumière, par une approche multi-échelle et multi-critère, les différents compromis qui peuvent émerger à l'occasion de tels changements de pratiques pour l'agriculture irriguée.

4.2 Adoption et diffusion des low-techs : réflexions tirées de l'étude de deux territoires irrigués méditerranéens

4.2.1 Water User Fab Labs, vitrines de l'innovation ?

De nombreuses études ont cherché à identifier les facteurs influençant l'adoption (à l'échelle de l'individu) et la diffusion (comme agrégation de l'adoption dans l'espace et dans le temps) de l'innovation technologique pour l'agriculture (Tey et Brindal, 2012; Shang et al., 2021; Pathak et al., 2019; Barnes et al., 2019). Dans son ouvrage "Diffusion of innovations", Rogers (1983) propose une classification conceptuelle des profils d' "adoptants" de l'innovation. Son modèle de diffusion distingue cinq catégories d'usagers en fonction de leur relation à l'innovation dans le temps : les innovateurs (*innovators*), les adoptants précoces (*early adopters*), la majorité précoce (*early majority*), la majorité tardive (*late majority*) et les réfractaires (*laggards*). Bien que stéréotypée, cette classification a été largement reprise par la littérature dans la mesure où elle apporte un cadre utile pour guider les efforts de la recherche d'innovation, notamment pour appréhender la réponse de l'hétérogénéité de la population des agriculteurs aux nouvelles technologies pour l'agriculture (Bellon-Maurel et Huyghe, 2016).

Les Water User Fab Labs (WFL) se sont révélés comme des environnements propices à la création, au sein desquels les échanges entre acteurs ont favorisé la définition des besoins et la construction de différents outils en réponse. Les ateliers de co-construction organisés sur place et l'expérimentation au champ par les agriculteurs ont montré qu'il était possible de réduire les écarts de compétences et surtout de perception de la technologie entre le développeur et l'utilisateur (Lamb et al., 2008). Si l'on considère la terminologie de Rogers (1983), la contribution des agriculteurs membres des WFL place ces derniers dans la position d'innovateurs, ou d'initiateurs. Ainsi les WFL n'apparaissent non plus uniquement comme des fabriques à innovation, mais également comme des **fabriques à innovateurs**. Cette considération est particulièrement intéressante dans la me-

sure où de nombreuses études identifient les agriculteurs pionniers (adoptants et majorité précoces) comme la base nécessaire à la diffusion de l'innovation agricole (Diederer et al., 2003 ; Freeman, 1985 ; Rogers, 1983 ; Machenaud et al., 2014). Par ailleurs, la majorité des études portant sur les facteurs de l'adoption des technologies d'agriculture de précision s'accordant à identifier la grande dimension des exploitations et leur sécurité financière comme déterminantes pour le profil d'initiateur (Pierpaoli et al., 2013), cette réflexion suggère que le développement des WFL représente une opportunité d'ouverture à l'innovation pour une plus grande diversité de systèmes de production.

La diffusion de l'innovation au sein d'un territoire rural représente un processus de moyen à long terme selon les contextes (Montes de Oca Munguia et al., 2021). Un mécanisme dont la dynamique temporelle reste, dans tous les cas, peu compatible avec les échéances des projets de développement, projets de recherche ou projets de thèse. Dès lors se pose la question de la pérennité de l'innovation qui a germé dans le cadre du projet, et de sa diffusion indépendamment de ce dernier. Nous avons vu plus tôt l'importance des agriculteurs initiateurs à ce stade du processus de diffusion, qui, à l'initiative de la mise en place d'une nouvelle pratique, inspirent les autres agriculteurs du territoire. Toujours selon la classification de Rogers (1983), c'est alors au tour des adoptants précoces de s'emparer de l'innovation, souvent à partir du partage d'expérience d'un agriculteur initiateur, et de participer à la diffusion de la nouvelle pratique. A la lumière de ces considérations, nous suggérons que les WFL auraient le potentiel d'assumer ce rôle de **vitrine de l'innovation**. Nous pouvons par ailleurs supposer que la portée des WFL comme vecteurs de diffusion des low-techs numériques serait accrue en étant adossés aux associations d'usagers de l'eau ou autres groupements d'agriculteurs (CUMA, AOP, GIEE, etc.).

4.2.2 Potentiel d'adoption de la low-tech numérique pour l'agriculture, éclairages de la plaine irriguée d'El Haouaria

Nous avons fait l'hypothèse précédemment que les Water User Fab Labs pouvaient endosser la fonction de vitrines de l'innovation au sein des territoires irrigués. Pour autant, le bon fonctionnement du WFL ne garantit pas nécessairement une meilleure adoption dans le reste du territoire. Par analogie avec la conduction thermique, la chaleur dégagée par le WFL ne se diffusera de proche en proche qu'à la condition qu'une part de la population d'agriculteurs du territoire soit conductrice, ouverte à l'innovation, tandis qu'un environnement isolant limitera toute diffusion depuis le WFL. En d'autres termes, il s'agira d'apprécier, en étudiant l'inclinaison des agriculteurs du territoire pour l'innovation, si la nature de la vitrine du WFL tient davantage de la vitrine de musée ou de la vitrine de marché.

Nous avons tenté d'apporter quelques éléments de réponse à cette question à l'aide d'un travail d'enquête réalisé sur le site d'étude tunisien, dans le cadre du stage ingénieur d'Oliver Sainlez (2022) (Fig.4.1). L'objectif était de comprendre, au delà des limites du Fab Lab d'Echraf, l'attitude d'une diversité d'agriculteurs face à l'innovation que représente le *Pilowtech*, capteur d'humidité du sol à bas coût pour le pilotage de l'irrigation goutte à goutte (Chapitre 3.2). Vingt entretiens semi-directifs ont été conduits sur le territoire de la plaine d'El Haouaria, selon un échantillonnage basé sur la typologie établie lors du diagnostic agraire (Chapitre 2.2). Le questionnaire utilisé, fourni en annexe E, était structuré en trois parties visant à i) évaluer la perception des enjeux de l'eau et les pratiques d'irrigation de l'agriculteur enquêté ; ii) introduire l'innovation de manière interactive et évaluer pratiquement l'attitude de l'agriculteur vis à vis de l'outil ; iii) appréhender les déterminants de l'adoption propres à chaque agriculteur.

Cette étude complémentaire, à l'échantillon modeste ($n = 20$) et non représentatif de l'ensemble des systèmes de production du territoire d'El Haouaria, apporte néanmoins quelques éclairages intéressants sur le potentiel d'adoption du



FIGURE 4.1 – Étude du potentiel d'adoption du *Pillowtech*, capteur d'humidité du sol à bas coût. Juin 2022, El Haouaria, Tunisie. Crédit : Oliver Sainlez.

Pillowtech au delà du cadre du WFL. L'analyse des correspondances multiples (ACM) des résultats d'enquête, détaillée par Sainlez (2022), a permis de mettre en évidence certaines tendances entre les déterminants de l'adoption (Roussy et al., 2015) et les trois systèmes de production (SP) représentés dans la population : les "arboriculteurs absentéistes", les "maraîchers intensifs" et les "petites exploitations familiales" (Chapitre 2.2). Les résultats d'ACM ont d'abord permis de distinguer un petit groupe de "réfractaires" (10% de la population, 33% des maraîchers intensifs), selon la classification de Rogers (1983), d'un groupe majoritaire présentant de l'intérêt pour le capteur d'humidité du sol *Pillowtech* (90% de la population). Au sein de ce second groupe d'intéressés, deux profils d'adoptants de l'innovation se sont dégagés. D'une part, un profil d'agriculteur à haut niveau d'éducation, conscient de l'état de la ressource en eau, habitué au pilotage de l'irrigation, exprimant un besoin "amont" (préalable à l'entretien) pour cette technologie et une volonté d'investissement importante (supérieure à $500 \text{ DT} \cdot \text{ha}^{-1}$). Ces facteurs d'adoption étaient associés, selon l'ACM, avec le SP "arboriculteurs absentéistes" (Chapitre 2.2). D'autre part, un profil d'agriculteur à moindre niveau d'éducation, pratiquant l'irrigation "au doigt mouillé", peu conscient de la pression sur la ressource en eau, témoignant d'un besoin

"amont" modéré, et avec une volonté d'investissement plus faible (inférieure à $250 \text{ DT} \cdot \text{ha}^{-1}$). Ces facteurs d'adoption ont été identifiés par l'ACM comme correspondants avec le SP "exploitation familiale". Ces résultats suggèrent donc une tendance des agriculteurs représentant le SP "arboriculteurs absentéistes" à appartenir à la catégorie des précurseurs de l'innovation (early adopters selon Rogers (1983)), tandis que les agriculteurs du SP "exploitations familiales" appartiendraient plutôt à la catégorie des suiveurs (early and late majority de Rogers (1983)).

Pour autant, d'autres relations mises en évidence dans le cadre de cette analyse permettent de nuancer cette première interprétation. Le groupe des arboriculteurs absentéistes a montré une meilleure aptitude à la lecture des données d'humidité du sol présentées sous forme de graphique en temps réel, visualisables sur la plateforme en ligne. A l'inverse, le SP "exploitations familiales" était associé, selon l'ACM, avec une préférence pour la lecture des données au moyen du boîtier de lecture, qui permet de visualiser au champ le niveau de remplissage de la réserve utile. L'ACM a également souligné une correspondance entre le SP "arboriculteurs absentéistes" et la préférence pour l'utilisation d'un outil "clés en main". En revanche, le SP "petites exploitations familiales" a globalement exprimé préférer accéder à la technologie par le biais d'ateliers de construction collectifs, dans la mesure où apprendre à fabriquer et réparer l'outil pouvait réduire de moitié les dépenses. La volonté d'investissement des arboriculteurs absentéistes était supérieure au coût du *Pilowtech* dans 100% des cas. La volonté d'investissement des exploitations familiales était nulle dans 12% des cas, limitante dans 38% des cas (moins de trois capteurs à l'hectare) et supérieure au coût du *Pilowtech* dans 50% des cas. Finalement, 90% des individus appartenant au SP "arboriculteurs absentéistes" et 100% des agriculteurs du SP "petites exploitations familiales" ont exprimé un besoin pour cet outil d'aide à la décision pour le pilotage de l'irrigation au terme de l'entretien (besoin aval). Ces résultats suggèrent par conséquent que le SP "petites exploitations familiales" aurait le potentiel pour s'inscrire dans la catégorie des précurseurs ou adoptants précoces de l'innovation, selon certaines conditions.

Les éclairages apportés par cette étude sur le potentiel d'adoption du *Pilow-tech* dans la plaine irriguée d'El Haouaria nous permettent de formuler quelques hypothèses relatives au potentiel d'adoption de l'innovation low-tech numérique pour l'agriculture. Nous avons vu que les facteurs déterminants de l'adoption d'innovations pouvaient être relativement bien expliqués par la représentation systémique de l'agriculture d'un territoire. Pour autant, la systématisation des profils d'adoptants de l'innovation s'est montrée peu pertinente et devrait être évitée. Nous suggérons qu'au delà des apparences, les petits systèmes de production familiaux, au Nord comme au Sud global, ont leur place dans le processus d'innovation technologique et la transition numérique de l'agriculture. Si nous considérons les conditions qui ont permis au SP "petites exploitations familiales" de passer conceptuellement du statut de "suiveurs" à celui de potentiels "adoptants précoces", il s'agit de la complexité de l'outil (mode de lecture des données), de son mode d'accès (système co-construit ou clés en mains) et de son coût (volonté/capacité d'investissement). Dans cette perspective, nous suggérons que la co-conception d'innovations technologiques, adaptables aux contextes agraires à travers les WFL et accessibles économiquement et techniquement, a favorisé et favorisera l'inclusion d'acteurs habituellement exclus du processus d'innovation. Nous voyons dans cette démarche participative et low-tech un moyen d'**inclure les laissés pour compte du numérique agricole** et de déjouer certaines des limites actuelles au développement de l'agriculture de précision.

4.2.3 Freins, moteurs et glissement des limites à l'adoption des nouvelles technologies

La dissémination des low-techs numériques pour l'agriculture sera, en dépit de leur plus grande accessibilité, inévitablement confrontée à certains freins, qui peuvent différer des barrières à l'adoption habituellement identifiées pour les technologies d'agriculture de précision (Barnes et al., 2019). L'expérience acquise à travers l'animation des Water user Fab Lab français et tunisien nous a permis d'envisager quelques unes de ces limites potentielles. Les innovations développées dans le cadre de ce projet impliquent pour l'utilisateur d'adopter une posture "do it yourself", c'est l'essence des WFL qui ont été pensés pour héberger la fabrication et la maintenance des low-techs. Courant en agriculture (Kefi et al., 2023 ; Benouniche, Zwarteveen et al., 2014), ce nécessaire bricolage peut dans une certaine mesure, à rebond des intentions, représenter un frein à l'adoption des innovations. Cette limite éventuelle peut s'illustrer à travers trois composantes : compétence, patience et maintenance.

La fabrication et la maintenance des systèmes proposés restent exigeantes en **compétences**. Ainsi par exemple la conception et l'utilisation du capteur d'humidité du sol *Pilowtech* impliquent du savoir-faire dans les domaines de l'agronomie mais aussi de la micro-électronique, des technologies de l'information et de la communication, et de la programmation informatique (Chapitre 3.2). Le travail effectué au sein des WFL pour rendre les technologies accessibles techniquement en les simplifiant au maximum s'est montré convaincant, néanmoins du chemin sépare toujours l'accessibilité d'utilisation de l'accessibilité de fabrication et de maintenance (et de calibration, le cas échéant) de l'outil. La diffusion de l'innovation en dehors du cadre du WFL sera donc dépendante de capacité de ces derniers à transmettre le bagage de compétences nécessaires, et de la curiosité des agriculteurs intéressés. A cette considération vient s'ajouter **le risque d'une innovation à deux vitesses**, c'est à dire le risque d'une évolution des composants des systèmes développés (micro-contrôleurs, protocoles de télécommunication IoT, plateformes de visualisation des données) plus rapide que leur

vitesse d'adoption et de diffusion. Les secteurs de l'électronique embarquée et de l'IoT ont fait des progrès considérables au cours de ces dernières années, et le nombre de fournisseurs de composants hardware et software a été démultiplié. Cette offre croissante ouvre de nouvelles possibilités d'amélioration des prototypes (réduction des coûts, simplification des circuits électroniques, etc.) mais ne doit pas faire perdre de vue la nécessité d'une version stable, épargnée par l'obsolescence logicielle, qui laisse le temps de l'appropriation aux usagers.

Par ailleurs, l'expérimentation des capteurs low-tech en conditions réelles au cours de la saison d'irrigation 2022 a mis en évidence le besoin en **maintenance** des prototypes développés (Chapitre 3). L'élaboration de protocoles de maintenance et l'amélioration continue des prototypes a permis à terme de réduire ce besoin en maintenance, sans pour autant le faire disparaître complètement (Fig.4.2). Cette donnée, résultat de la recherche de compromis entre accessibilité et robustesse, peut représenter une limite à la durabilité de l'adoption de l'innovation dans le temps, et vient ainsi s'ajouter à la bien documentée problématique de la maintenance des infrastructures hydrauliques (Ward, 2010 ; Huppert et al., 2003).

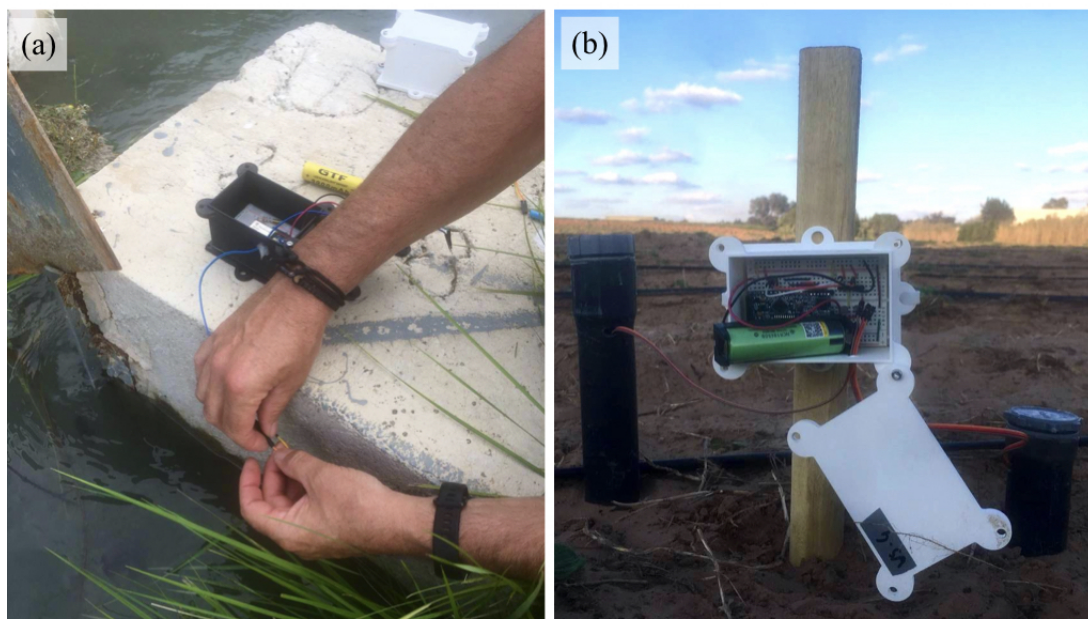


FIGURE 4.2 – Maintenance d'un capteur *Flowter*, WFL de la Crau (a), et d'un capteur *Pillowtech*, WFL d'Echraf (b).

Ce point nous amène à considérer une troisième dimension limitante, en lien avec les deux premières : le temps. Nous l'avons vu, l'adoption des outils d'aide à la décision numériques low-techs peut demander du travail d'apprentissage, pour s'approprier les compétences requises à leurs fabrication et utilisation, et du travail régulier de maintenance, pour s'assurer de la fiabilité des mesures au champ. Ce facteur peut s'avérer limitant dans la mesure où il peut pousser les agriculteurs à se détourner de l'innovation par manque de temps en cas de pic de travail, ou à préférer une solution commerciale clés en main si leur capacité d'investissement le permet. En somme, ces réflexions semblent indiquer un **glissement des barrières à l'adoption des technologies** pour l'agriculture de précision à l'échelle de l'individu : d'ordre principalement économique (Barnes et al., 2019) et technique (Lamb et al., 2008) pour l'agriculture de précision high-tech et top-down, elles relèvent davantage de facteurs sociaux (disponibilité) et comportementaux (curiosité) dans le cadre d'une approche low-tech et bottom-up.

4.2.4 Ateliers de conception, arme de diffusion massive

Dans l'optique d'explorer plus largement le potentiel d'adoption des low-tech numériques pour la gestion de l'eau agricole, et de le confronter aux limites préalablement envisagées, des ateliers participatifs de construction sur la base des systèmes développés ont été menés auprès de différentes catégories d'acteurs agricoles, en dehors des limites des Water user Fab Labs (Fig.4.3).

Ateliers de co-construction avec les agriculteurs

Suite au développement des premiers prototypes de capteurs low-tech au sein des WFL, des ateliers de co-construction ont été réalisés avec des agriculteurs en élargissant la sphère initiale des WFL. L'objectif de ces ateliers était double : tester cette méthode comme i) moyen de diffusion, et ii) moyen d'amélioration des innovations et des supports de diffusion. Le format des ateliers était le suivant : i) présentation de l'innovation (enjeux, fonctionnement, objectifs de l'atelier) ; ii) fabrication du capteur par chaque participant en suivant le tutoriel ; iii) essais des



FIGURE 4.3 – Ateliers de co-construction de capteurs low-tech pour la gestion de l'eau agricole, en présence : d'agriculteurs (a), de représentants d'organisations agricoles (b), multi-acteurs (c), d'enseignants chercheurs (d).

capteurs en groupe ; iv) retour des participants : commentaires d'amélioration sur le tutoriel, éventuels points de blocage durant la fabrication, commentaires sur leur perception de l'utilité et la praticité du capteur, questions. Ce type d'atelier a été expérimenté en France (les 13/07/2022 et 22/11/2022) et en Tunisie (le 08/03/2023) auprès d'une trentaine d'agriculteurs. Les dernières versions des tutoriels de fabrication :

1. du *WatAr*, capteur connecté à bas coût pour le pilotage de l'irrigation de surface par détection de la lame d'eau en temps réel, utilisé et amélioré avec les agriculteurs pratiquant le système de culture "Foin de Crau", est donné en annexe F.

2. du *Pilowtech*, capteur connecté à bas coût pour le pilotage de l'irrigation par suivi de l'humidité du sol en temps réel, utilisé et amélioré avec les agriculteurs pratiquant l'irrigation au goutte à goutte de systèmes maraîchers et arboricoles, est donné en annexe G.

Ateliers de construction multi-acteurs

Au delà de la co-construction avec les agriculteurs, nous avons également cherché à évaluer le potentiel de cette méthode auprès d'une diversité d'acteurs du monde agricole : enseignants chercheurs (Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem, Sousse), représentants de collectifs d'agriculteurs (chambre d'agriculture, AOP) et d'associations de producteurs (associations d'usagers de l'eau, associations agroécologiques). Des ateliers de construction ont par ailleurs été réalisés dans le cadre de formations supérieures en agronomie auprès d'une trentaine d'étudiants en France (Master Eau et Agriculture, Montpellier) et en Tunisie (Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem, Sousse).

Le forum multi-acteurs pour l'agroécologie en Afrique du nord *ANzAr*, a rassemblé en périphérie de Tunis les 9 et 10 Mars 2023 agricultrices et agriculteurs, chercheuses et chercheurs et associations environnementales de l'Algérie, du Maroc et de la Tunisie autour du partage de pratiques agroécologiques. Un atelier de construction du *Pilowtech* a été organisé dans ce cadre avec la participation d'une dizaine d'acteurs (agriculteurs, représentants d'associations agroécologiques, agronomes). Au terme de l'atelier, une fiche d'évaluation a été distribuée en vue d'évaluer la portée de cette méthode et d'imaginer des méthodes de diffusion complémentaires (annexe H).

Les résultats ont montré que la thématique de l'atelier était une découverte pour 90% des participants. L'atelier a été jugé utile avec une moyenne de 4,6 sur une échelle d'utilité allant de 1 à 5. A la question de la principale idée clé retenue, les réponses suivantes ont été obtenues : ce genre d'outil peut aider à "gérer"/"rationaliser"/"optimiser"/ l'usage de l'eau (dans 40% des réponses) ; l'outil est "facile"/"simple" à fabriquer (dans 30% des réponses) ; l'outil est "peu cher"/"à bas prix"/"de faible coût" (dans 30% des réponses) ; l'outil est "utile"/"efficace"

(dans 20% des réponses) ; l'outil permet de comprendre la relation eau-sol (dans 10% des réponses). 100% des participants ont exprimé leur désir d'en savoir plus sur le sujet, et leur volonté d'essayer de fabriquer le *Pilowtech* chez eux. 100% des participants ont affirmé vouloir parler de cet outil à leur entourage et réseaux agricoles respectifs (par exemple "à mes amis agriculteurs capables", "à des amis dans ma région", "aux producteurs de notre coopérative", "avec le réseau de l'association tunisienne d'agriculture environnementale", "avec des producteurs d'épices à Nabeul", "aux producteurs du réseau des initiatives agroécologiques au Maroc"). Enfin, à la question des supports préférés pour accompagner et faciliter la diffusion de l'outil, les réponses suivantes ont été obtenues : "formation"/"conseil" sur place (dans 60% des réponses), "tutoriel vidéo" (dans 50% des réponses), "tutoriel papier" (dans 20% des réponses), "conseil à distance" (dans 20% des réponses), précisions techniques ("étapes de calibration", "schémas et pièces", "fiche technique") dans 30% des réponses.

Les ateliers de construction de low-techs comme moyen de diffusion et de transformation de l'innovation

En fin de compte, la conduite d'ateliers de construction de capteurs low-tech pour la gestion de l'eau avec une centaine d'acteurs variés du secteur agricole nous permet de proposer les conclusions et perspectives suivantes. L'accessibilité technique du *WatAr* et du *Pilowtech*, capteurs à bas coût pour accompagner la gestion en temps réel de l'irrigation, a été éprouvée et validée. De fait, l'ensemble des participants, composant une population hétérogène en âge (de 20 à 75 ans), en niveau d'éducation (primaire à doctorat) et en catégorie socio-professionnelle (étudiants, agriculteurs, milieu associatif, ingénieurs et enseignants-chercheurs), s'est montré intéressé et capable de fabriquer le capteur low-tech proposé dans le cadre des ateliers. Cette méthode a néanmoins reposé sur une animation par les intervenants pour accompagner les participants dans les étapes de la fabrication des outils. Aussi le format des ateliers n'a pas permis pour autant d'évaluer la capacité des participants à s'approprier l'innovation de manière indépendante. Pour aller plus loin, il serait intéressant d'organiser des ateliers sans animation,

afin d'explorer davantage le niveau d'autonomie des usagers vis à vis de la technologie et des supports de diffusion proposés.

Notre expérience suggère par ailleurs la pertinence de cette méthode comme **facilitateur pour la diffusion de l'innovation au sein des territoires ruraux**. A l'image des Water user Fab Labs, l'organisation d'un atelier peut s'appuyer sur des réseaux d'acteurs déjà existants (associations d'usagers de l'eau, coopératives, association de producteurs, réseau d'appellation, etc.). Elle peut également contribuer à faciliter la création de nouveaux réseaux d'acteurs, aux échelles locales ou régionales, comme nous l'avons vu à travers l'exemple du forum ANzAR. Dans le cadre d'ateliers multi-acteurs, la méthode peut devenir un outil pour ouvrir, à partir de considérations techniques, une réflexion plus large sur les usages et le partage de la ressource en eau au sein d'un territoire irrigué, à l'instar des jeux sérieux (Venot, C. B. Jensen et al., 2022). L'expérience a également souligné que la portée de diffusion des ateliers pouvait s'étendre au delà de leur cadre strict, les participants ayant exprimé leur volonté de partager les connaissances acquises avec leurs réseaux respectifs.

En définitive, les ateliers de co-construction peuvent être perçus comme le reflet des forces de l'innovation low-tech et participative. L'accessibilité technique et la plasticité des low-techs numériques rendent possible leur co-conception, en amont à travers les WFL, mais aussi en aval à travers ces ateliers, qui contribuent de fait au processus d'innovation. Au delà d'une simple méthode de diffusion, la participation des acteurs représente un moyen de transformation de l'innovation. Par leur retour, les participants contribuent à l'amélioration continue des supports de diffusion, et des outils. En outre, chaque nouveau réseau d'acteurs représente autant d'adaptations, bricolages et re-conceptions potentielles des technologies pour la gestion de l'eau, selon les besoins et contraintes de ces premiers. Autrement dit, autant de points d'entrée vers de nouveaux cycles pour le modelage à façon de l'innovation (Chapitre 2.3).

4.3 Article IV - Revisiting border irrigation management : benefits of new in-field sensor-based control compared to conventional cutoff times

Paul Vandôme¹, Amine Berkaoui¹, CrysteLe Leauthaud¹, Cedric Guillemain¹, Gilles Belaud¹.

[1] G-EAU, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, IRD, INRAE, Institut Agro, Univ. Montpellier, 361 rue J.F Breton, 34196 Montpellier, France.

Ces travaux ont été soumis pour publication dans la revue *Agricultural Water Management*, dans le cadre du numéro spécial du projet de recherche HubIS.

4.3.1 Résumé

L'irrigation de surface est souvent décrite comme peu performante, dans la mesure où sa pratique est exigeante en main d'oeuvre et implique la mobilisation de masses d'eau importantes qui sont difficiles à quantifier et à gérer. Pourtant, cette pratique reste prédominante dans le monde, et la modernisation vers des systèmes d'irrigation localisée n'est pas toujours faisable ou désirable. Afin d'accompagner la gestion de l'irrigation à la planche, nous avons précédemment développé un capteur à bas coût, qui informe à distance l'agriculteur de l'arrivée de la lame d'eau à l'aval de la parcelle, facilitant ainsi la prise de décision relative à l'arrêt de l'irrigation. Les objectifs de cet article étaient : i) de déterminer la position optimale de ce capteur dans la longueur de la parcelle au cours de la saison, et ii) de comparer l'influence de scénarios de gestion (interruption de l'irrigation basée sur le capteur ou sur des durées) sur les performances de l'irrigation. A ces fins, un modèle agro-hydraulique intégré a été développé pour simuler les dynamiques des flux d'eau de surface en incluant les variations d'infiltration et de rugosité du couvert au cours de la saison. Le modèle a été alimenté à partir de données issues du suivi de l'irrigation à la planche d'une parcelle de foin durant

toute une saison d'irrigation. Les résultats ont montré que la position optimale du capteur pouvait varier de 10% au gré des variations saisonnières, en fonction des débits injectés, des humidités du sol initiales et de la rugosité du couvert (Manning's roughness). Le pilotage de l'irrigation par capteur s'est montré plus efficient que les pratiques usuelles, et plus efficace que des durées d'irrigation optimisées (cutoff time) pour limiter les écarts de performance induits par la variabilité ou l'incertitude des conditions initiales. Les méthodes et les résultats obtenus devraient servir de base pour des études à plus grande échelle simulant l'adoption de capteurs et pratiques basées sur l'acquisition de données en temps réel pour la gestion de l'irrigation de surface.

**Revisiting border irrigation management: benefits of new in-field
sensor-based control compared to conventional cutoff times**

Paul Vandôme¹, Amine Berkaoui¹, Crystele Leauthaud¹, Cedric Guillemain¹, and Gilles Belaud¹

¹G-EAU, BRGM, AgroParisTech, Cirad, IRD, INRAE, L'Institut Agro, Univ. Montpellier,
Montpellier, France.

ABSTRACT

Surface irrigation is often described as low performing insofar as its practice is labour intensive and involves the use of large water flows that are difficult to quantify and manage. However, this method remains predominant worldwide, and modernisation towards localised irrigation systems is not always feasible or advisable. To support border irrigation management, we previously developed a low-cost sensor for surface irrigation management, which remotely informs the farmer of water arrival downstream of his field and therefore of the moment to stop irrigation. The objectives of this article were: i) to determine the optimal position of this sensor lengthwise in the field throughout the season, and ii) to compare the influence of management scenarios (sensor-based or time-based cutoff) on irrigation performance. To this end, an integrated agro-hydraulic model was developed to simulate surface water flow dynamics throughout the season including variations in infiltration and roughness. The model was fed using monitoring data from the border irrigation of a hay field during a whole season. The results showed that the optimal sensor position can change by 10% over the course of the season, depending on inflow rates, initial soil moisture and Manning's roughness. Sensor-based irrigation control was found to be more efficient than actual practices, and more effective than an optimised cutoff time in limiting performance gaps induced by variability or uncertainty in the initial conditions. The methods and findings should serve as a basis for larger-scale studies integrating the adoption of sensors and real-time data for surface irrigation management.

INTRODUCTION

Surface irrigation is often described as not very efficient insofar as its practice is labour-intensive and involves the use of large flows of water that are difficult to quantify and manage. However, this method remains predominant worldwide (Pereira and Gonçalves 2018), and modernisation towards localised irrigation systems is not always feasible nor desirable (Venot et al. 2017; Renault 1993). In this context, research has long been engaged in developing methods to assess and improve the performance of surface irrigation (Pereira et al. 2002; Burt et al. 1997). In the case of border irrigation, water is applied by the overflow of a canal at the highest point of the field and then flows down a slight slope to the lower point. The dynamics of the water flow is driven by the geometric variables (dimensions, slope) of the fields, the irrigation practices (flow rate, cutoff time), and the properties of the substrate (roughness, infiltration). Many studies have shown that it was possible to improve the performance of border irrigation by optimizing the topography (González-Cebollada et al. 2016), the dimensions of the borders (Nie et al. 2021; Anwar et al. 2016) and the practices by adjusting irrigation duration according to soil characteristics and inflow rates (Nie et al. 2019; Morris et al. 2015). Several numerical models have been developed to study border irrigation, the most commonly used being field-scale and event-based models representing the advancement of the water front in one dimension, such as SISCO (Gillies and Smith 2015), WinSRFR (Bautista et al. 2009) and SIRMOD (Walker 2003).

Research has particularly focused on the optimisation of cutoff times, i.e. the time at which the water supply is turned off, firstly because of its significant effect on irrigation performance, and secondly because of the convenience of adjusting this parameter in the field. Practically, it is preferable for a farmer to know the theoretical optimum duration of his irrigation rather than the cutoff distance, which would require time-consuming monitoring of the water advance over the field. However, this approach may have some limitations under real conditions, due to the spatio-temporal variability of the parameters. Xu et al. (2019) showed for example that temporal variation of infiltration and roughness in different seasons had significant impacts on surface water advance times and performances. Furthermore, variations in inflow rates are practically inevitable

in surface irrigation systems, for reasons both internal (lack of measurement systems, flow rates distribution within the farm) and external (collective water management rules, water allocation restrictions, etc.) to the farm. In these circumstances, the search for a cutoff distance ratio (CR), defined as the ratio of the advance distance at cutoff to the total field length, rather than a cutoff time may possibly help to mitigate uncertainties (Salahou et al. 2018). However, to our knowledge, few studies have sought to assess the effects of management using a distance-based cutoff rather than a time-based cutoff, taking into account the seasonal variability of the parameters.

Recent technological advances in the fields of on-board electronics and long-range communication networks have led to the development of new wireless sensor networks for agriculture (Hamami and Nassereddine 2020). For example, Pramanik et al. (2022) showed that the application efficiency of basin irrigation could be improved by the use of an automatic soil moisture-based system. In Vandôme et al. (2023), we explained how we developed a low-cost wireless sensor to support farmers performing border irrigation. Installed in the field, this sensor provided the farmer with remote information about the arrival of water downstream of his field, and thus supported the decision to stop irrigation. By making sensor-based irrigation control economically and technically accessible, these new technologies are likely to spread widely beyond the world of precision agriculture and might be adopted in surface irrigation systems. The impact of the adoption of such practices on the performance of border irrigation remains to be assessed. More specifically, where should the sensor be located on the field to meet water requirements while optimising application efficiency? How can changes in this optimum position be predicted over the course of the season? And to what extent is this practice beneficial compared with the cutoff times traditionally used?

The irrigated territory of the Crau (600km^2), South of France, counts 14000 ha of border irrigated hay by water distributed through a network of open channels from the Durance river. The hay meadows, which are multispecific and permanent, are harvested three times a year for an total yield of around $10\text{ T}\cdot\text{ha}^{-1}$. Surface irrigation is traditionally practised on open-ended borders ranging in length from 100m to 500m and slope from 0.2% to 0.4%. The irrigation schedule, mainly imposed by the Water User Associations, covers the months from March to October with

a frequency of eight to ten days (Merot et al. 2008a). In most cases, farmers' experience guides practices, and especially decision-making on the cutoff: at the start of the irrigation event, the farmer estimates approximatively how long it will take for the water to advance downstream of the field, then makes several return visits to the field to check progress before stopping when he considers that there will be sufficient inertia to cover the remainder of the field. This practice has the inconvenience of being i) very labour-intensive, as irrigation is carried out 24/7; ii) very irregular, as the variability of initial conditions and the irrigator's lack of availability can easily lead to insufficient irrigation or, conversely, over-irrigation. With applied irrigation volume of around $20,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$, of which 60% to 80% is drained and percolated, the irrigation efficiency of the Crau hay is low (Merot et al. 2008b), and the increasing pressure on water resources in the region raises the question of the system's sustainability. However, several studies have highlighted the importance of border irrigation in recharging the Crau aquifer, which provides domestic water for 300,000 residents and irrigation water for around 5,000 ha of micro-irrigated orchards (SINERGI 2020; Olioso et al. 2013; Saos et al. 2006). Given this fragile balance, the search for tools to better understand and manage border irrigation is essential.

In the light of these considerations, the objectives of this study were i) to determine the optimal position of a water detection sensor for the control of border irrigation over the season, and ii) to compare the effects of the sensor-based control with the use of cutoff times on the application efficiency and the satisfaction of water requirements of border irrigation. In order to take into account the temporal variability of Manning's roughness and infiltration parameters and its effect on hydrodynamics, we used a new integrated modelling framework (SurfIrri) based on the coupling of a surface water flow simulator with dynamic crop and soil models. The method was tested using data from the monitoring of the border irrigation of a 200 m long open-ended hay field, representative of practices in the Crau plain, during a whole irrigation season.

MATERIAL AND METHODS

Overall methodology

We addressed these objectives through an original approach combining the monitoring and simulation of surface irrigation water flows of a cultivated field at the time scale of the cropping season (Fig.1). The rapid growth of the crop under fluctuating climatic conditions and the regular changes in the inflow rates over the course of the season make it difficult to optimise border irrigation strategies on such a time scale. To account for this seasonal variability in initial conditions, we integrated models of surface water flow, vegetation growth and soil water content, which allowed dynamic simulation of changes in Manning’s roughness and soil moisture. The optimisation of irrigation strategies was then based on this seasonal variability in hydrodynamics to explore suitable and scalable management scenarios for the cutoff of border irrigation.

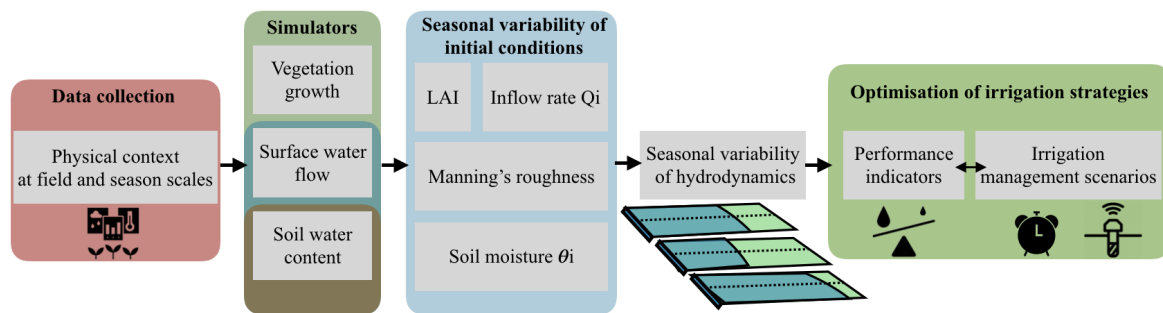


Fig. 1. Overall methodology of the study.

SurfIrri: an integrated model to simulate water flow dynamics in border irrigation

The aim of the SurfIrri model is to simulate in space and time the distribution of water flows on scales ranging from the field to the irrigation scheme. It was built by coupling several pre-existing models: i) a surface water flow simulator (adapted from the Calhy model, Bader et al. (2010)); ii) a leaf area index (LAI) variation simulator (adapted from the SPFC model, Mailhol and Merot (2008)) and iii) a soil water content variation simulator (adapted from SPFC, Mailhol and Merot (2008)). The coupling of the simulators and the spatio-temporal discretization of the model (Villafañe 2018) were carried out using the open-source OpenFluid platform (Fabre et al. 2010).

An overview of SurfIrr model is provided figure 2 and details of all the variables and parameters are given in Table 1.

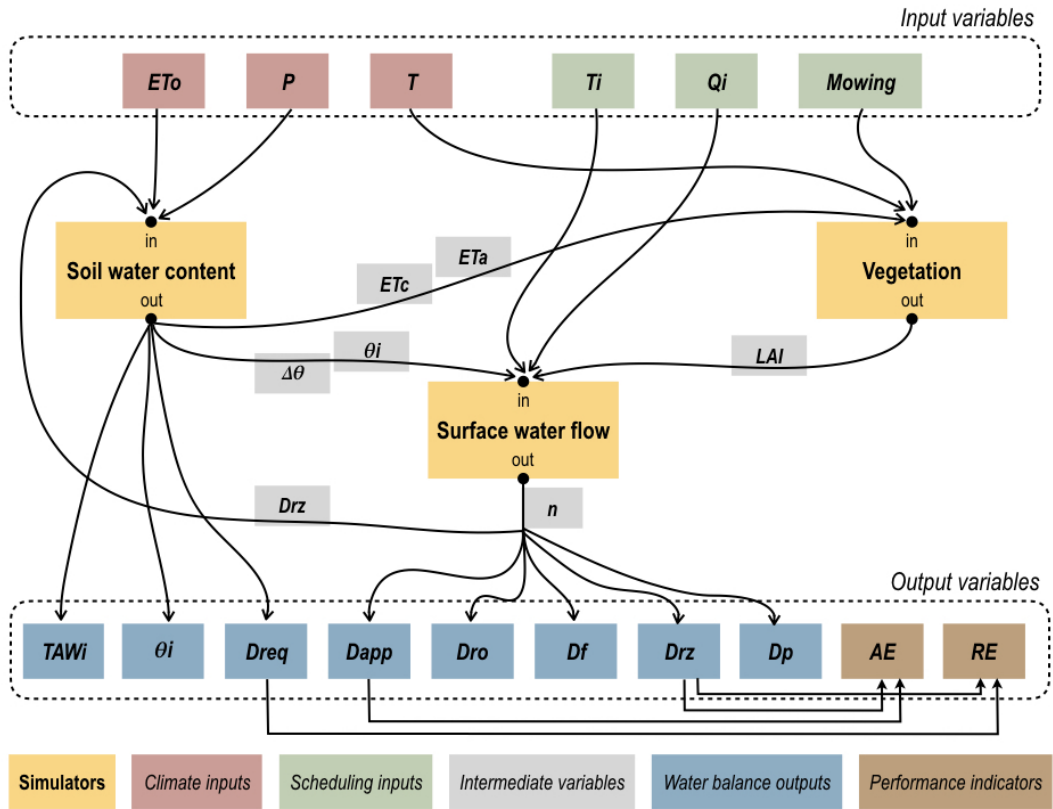


Fig. 2. SurfIrr model overview.

TABLE 1. Notations for the variables and parameters used in the Surfirri model.

Notation	Definition	Discretization	Unit
Input variables			
ET _o	Penman-Monteith reference evapotranspiration	h	mm
P	Rainfall	h	mm
T	Temperature	h	°C
T _i	Irrigation duration	n, h	hr
Q _i	Inflow rate	n, h	m ³ .s ⁻¹
Mowing	Crop mowing schedule	n, h	date
Parameters			
S	Slope of the field strip	n	m.m ⁻¹
L	Length of the field strip	n	m
w	Width of the field strip	n	m
Z	Thickness of the top soil horizon	n	mm
θ _s	Soil moisture content at saturation	n	m ³ .m ⁻³
θ _{FC}	Soil moisture content at field capacity	n	m ³ .m ⁻³
θ _{WP}	Soil moisture content at permanent wilting point	n	m ³ .m ⁻³
TAW	Total available soil water	n	mm
K _s	Soil hydraulic conductivity	n	m.s ⁻¹
H _f	Capillary suction at the wetting front	n	m
LAI _{max}	Maximum leaf area index	n	m ² .m ⁻²
LAI ₀	Initial leaf area index	n	m ² .m ⁻²
α, β	Empirical shape parameters for LAI	n	-
λ	Crop sensitivity to water stress	n	-
Simulated variables			
ET _c	Crop evapotranspiration	n, h	mm
ET _a	Actual evapotranspiration	n, h	mm
θ _i	Instant soil moisture content	x, t, n, h	m ³ .m ⁻³
Δθ	Soil saturation deficit	x, t, n, h	m ³ .m ⁻³
LAI	Leaf Area Index	n, h	m ² .m ⁻²
TT	Cumulative sum of temperatures	n, h	°C
WSI	Water Stress Index	n, h	-
n	Manning's roughness coefficient	n, h	s.m ^{-1/3}
H	Height of water at the surface of the field	x, t, n, h	mm
H _o	Average surface water retention	x, t, n, h	mm
Q _{in}	Inflow rate at spatial grid level	x, t, n, h	m ³ .s ⁻¹
Q _{rl}	Runoff outflow rate at spatial grid level	x, t, n, h	m ³ .s ⁻¹
F	Infiltrated depth at spatial grid level	x, t, n, h	mm
f	Infiltration rate	x, t, n, h	m ³ .s ⁻¹
D _{app}	Depth of water applied	n, h	mm
D _{ro}	Depth of water run-off in colature	n, h	mm
D _f	Depth of water infiltrated	n, h	mm
D _{rz}	Depth of water stored in the root zone	n, h	mm
D _p	Depth of water percolated	n, h	mm
TAW _i	Instant available soil water	n, h	mm
D _{req}	Depth of water required to fill the TAW	n, h	mm
AE	Application efficiency	n, h	-
RE	Requirement efficiency	n, h	-

δx is the intra-field spatial step and δt is the intra-event time step.

The spatial index *n* refers to the field *p_n* and the temporal index *h* refers to the hourly time *t_h*.

Simulation of surface water flow

Bader et al. (2010) developed Calhy as a monodimensional surface irrigation model at the spatial resolution of the field (considered as a homogeneous irrigation unit) and temporal resolution of the irrigation event. The model represented the evolution of the water runoff front in the field and at the outlet as a function of time, based on the first Saint-Venant equation (eq.1), the Manning-Strickler equation (eq.2) and the Green-Ampt infiltration model (eq.3, 4). The application of the equations translated as follows, their spatio-temporal discretization being described in Table 1 :

$$\frac{\delta H}{\delta t} = Q_{in} - \frac{\delta Q_{rl}}{\delta x} - f \quad (1)$$

with δH the water depth present on the surface between the abscissa $x - \delta x$ and x at time t (mm), Q_{in} the inflow rate by surface unit at abscissa x between times t and $t + \delta t$ ($m^3 \cdot s^{-1}$), Q_{rl} the runoff outflow rate by surface unit at x between times t and $t + \delta t$ ($m^3 \cdot s^{-1}$), f the infiltration flow between t and $t + \delta t$ ($m^3 \cdot s^{-1}$). The runoff outflow was estimated using the Manning-Strickler equation:

$$Q_{rl} = \frac{1}{n} \cdot \max(0; H - H_o)^{5/3} \cdot (S)^{1/2} \quad (2)$$

with n the Manning's roughness coefficient of plot p_n at time t_h ($s \cdot m^{-1/3}$), H_o the average surface water retention (mm) and S the slope of the field ($m \cdot m^{-1}$). Finally, the Green-Ampt model was used to simulate infiltration depending on topsoil saturation:

$$F < Z \cdot (\theta_s - \theta_i) \Rightarrow f = K_s \cdot \left[1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) \cdot (H_f - H)}{F} \right] \quad (3)$$

$$F \geq Z(\theta_s - \theta_i) \Rightarrow f = K_s \cdot \left[1 + \frac{H}{Z} \right] \quad (4)$$

with F the infiltrated depth (mm) at time t between $x - \delta x$ and x , Z the thickness of the top soil horizon (mm), θ_s the soil moisture content at saturation ($m^3 \cdot m^{-3}$), θ_i the instant soil moisture ($m^3 \cdot m^{-3}$), K_s the soil hydraulic conductivity ($m \cdot s^{-1}$) and H_f the capillary suction at the wetting front (m).

The spatio-temporal variation in the resistance to water flow due to changes in roughness induced by the vegetation cover was calculated from the experimental relationship of Mailhol and Merot (2008):

$$n = 0.05 + a \cdot [1 - e^{-LAI}] \quad (5)$$

with n the Manning's roughness coefficient of plot p_n at time t_h ($s.m^{-1/3}$), a an empirical parameter and LAI the leaf area index of plot p_n at time t_h .

Simulation of variations in the vegetation LAI

The changes in vegetation development were expressed through a leaf area index that varies in time and space depending on climate (adapted from Mailhol et al., 1997):

$$LAI = LAI_{max} \left[\left(\frac{\sum TT}{t_m} \right)^\beta e^{\frac{\beta}{\alpha} \left(1 - \left(\frac{\sum TT}{t_m} \right)^\alpha \right)} - (1 - WSI^\lambda) \right] + LAI_o \quad (6)$$

with LAI_{max} the maximum LAI, LAI_o the initial LAI, TT the cumulative sum of temperatures until t_h , t_m the cumulative temperature threshold to reach LAI_{max} , and WSI the water stress index, being the ratio between actual evapotranspiration and maximum evapotranspiration. At each mowing operation, the sum of the temperatures was reset to 0.

Simulation of variations in soil water content

The soil moisture simulator was built as a reservoir model based on the water balance principle, adapted from the SPFC model by Mailhol and Merot (2008). The instantaneous available soil water depth (TAWi) was calculated at each time step by adding the irrigation water depth stored in the soil ($Dr_{z,h}$) and subtracting the actual evapotranspiration (ETa) while $TAWi < TAW$:

$$TAWi_{n,h} = TAWi_{n,h-1} + \min(TAW_n; Dr_{z,n,h}) - ETa_{n,h} \quad (7)$$

Finally, the changes in instantaneous humidity and soil saturation deficit were calculated as follows:

$$\theta_i = \theta_{WP} + \frac{TAWi}{Z} \quad (8)$$

$$\Delta\theta = \theta_s - \theta_i \quad (9)$$

Performance indicators

The study focused on the analysis of two performance indicators. The application efficiency allows to distinguish the fraction of water consumed, stored in the soil, from the not-consumed fraction which includes tailwater runoff and deep percolation.

The application efficiency (AE) was thus computed as the ratio between the volume of water stored in the soil and the volume of water applied at each irrigation event (eq.10):

$$AE = \frac{D_{rz}}{D_{app}} \cdot 100 \quad (10)$$

Secondly, the requirement efficiency (RE) was used to evaluate the filling level of the soil total available water, in order to bring irrigation efficiency in line with agronomic objectives. The RE was thus calculated as the ratio between instant available water content and the total available water (eq.11):

$$RE = \frac{D_{rz}}{D_{req}} \cdot 100 \quad (11)$$

with D_{rz} the water depth stored in the root zone (mm) and D_{req} the water depth required to fill the TAW (mm).

Case study site

The study area (43.643748N, 5.016744E, WGS84) was located in the Crau plain, Southern France, in a farm producing 150 ha of surface irrigated hay. The cropping system, and particularly the irrigation practices, are representative of that found within the Crau plain comprising 14,000 ha of irrigated hay (Merot et al. 2008a). A field of 0.83 ha, 208m long, 40m wide and leveled with a slope of 0.36 %, was equipped for the monitoring of irrigation over a complete season, from March to October 2021.

Monitoring of input variables

Daily climate data (ET_o, P) were obtained from the Domaine du Merle weather station, located less than 1km from the experimental plot (43.642532N, 4.993516E). The irrigation schedule (schedule and duration of the events, T_i) was recorded using a water detection sensor (float system with data logger, EL-USB, Lascar electronics) positioned at the top of the field, at the canal overflow location. Installed in this way, the data logger recorded the periods during which irrigation was in progress (float in high position) throughout the irrigation season. The schedule was validated with the irrigation manager at the farm. The farmer also provided the hay mowing schedule.

The flow rates delivered to the plot (Q_i) were estimated from continuous monitoring (two-minute time step) of the water level upstream of the weir (h_{up}) feeding the distribution canal. The water depths were recorded by a pressure probe (Diver probe, SDEC), and the values were compensated with the atmospheric pressure measured continuously by a barometric probe. Flow rates were finally calculated by applying the law of a thin-walled rectangular weir, with no lateral contraction (eq.12):

$$Q_i = \mu \cdot l \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{up}^{3/2} \quad (12)$$

with Q_i the inflow rate ($m^3 \cdot s^{-1}$), μ the weir discharge coefficient (Bazin, 1898), l the width of the weir (m), g the gravitational constant ($m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$) and h_{up} the water depth upstream of the weir (m). Bazin's weir law was validated by flow gauging (ISO 748 standard) with an electromagnetic current meter (BFM 801, Hydreka).

Determination of the parameters

The characteristics of the experimental plot, considered as homogeneous, are summarised in Table ???. The slope (S) was obtained from the elevation profile measured using GPS topography equipment. The soil consisted of a superficial horizon of loam with a thickness of $Z = 650mm$ (Andrieux 1981) corresponding to the root exploration zone. The boundary with the highly draining subsoil of fractured pounding pebbles marked the limit of the system.

The total available water (TAW) was calculated from the characteristic soil moisture contents (θ_{FC}, θ_{WP}) identified by Mailhol and Merot (2008). Infiltration parameters (hydraulic conductivity and capillary suction at the wetting front) were obtained by fitting the Green & Ampt infiltration model with experimental data from the monitoring of an irrigation event (June 2022). During this monitoring, the progress of the water along the plot was measured at regular time intervals (10 min) by means of a GPS. Flow depths and recession were measured at three control points ($X = 16m, X = 79m, X = 138m$) using pressure probes (diver, SDEC). K_s and H_f were estimated by minimising the square error for Green-Ampt infiltration using the EVALUE method of WINSRFR 5.1.1 software (Bautista et al. 2009). Comparison between measured and simulated flow depths after the adjustment of the parameters (Fig.3) gave NSE coefficients of 0.98, 0.92 and 0.55 at the respective measuring stations $X = 16m, X = 79m$ and $X = 138m$. Finally, the parameters needed to simulate LAI variations (eq.6) determined by Mailhol and Merot (2008) in similar experimental conditions were retained.

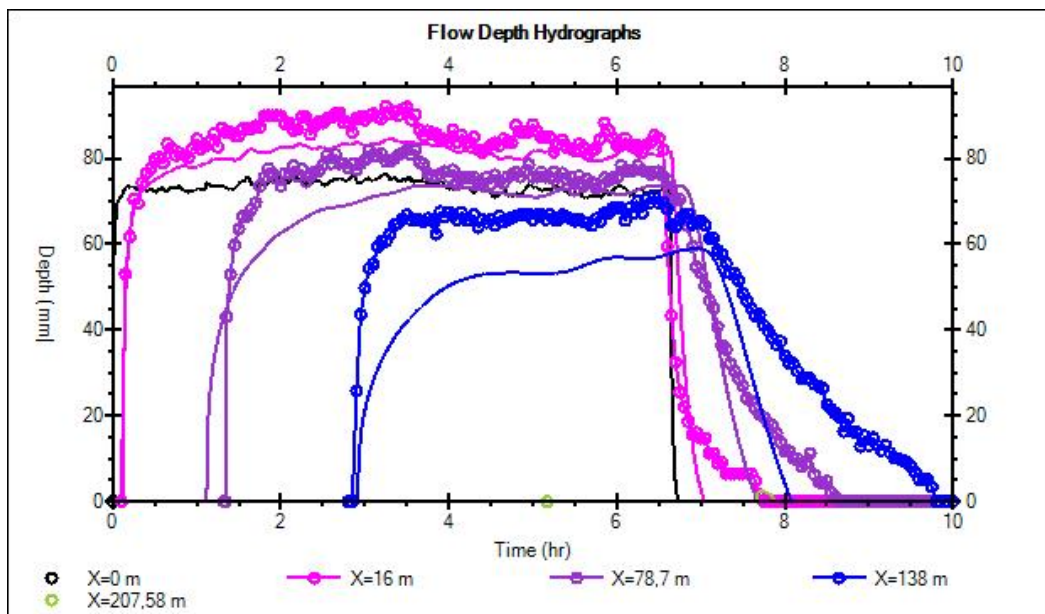


Fig. 3. Comparison of flow depths measured and simulated with WINSRFR software after adjustment of the infiltration parameters.

TABLE 2. Summary of the experimental field parameters

Width (m)	Lenght (m)	S (m/m)	Z (mm)	$\theta_{FC}(m^3/m^3)$	$\theta_{WP}(m^3/m^3)$	$\theta_s(m^3/m^3)$	H_f (m)	$Ks(m.s^{-1})$	$LAI_0(m^2.m^{-2})$	$LAI_{max}(m^2.m^{-2})$
40	208	$3.61.10^{-3}$	650	0.28	0.12	0.5	0.56	$8.08.10^{-6}$	2	7.7

Irrigation cut-off management scenarios

We first sought to determine the ideal positioning of the sensor lengthwise in the field (widthband considered to be homogeneous) according to the conditions of the irrigation event, i.e. mainly as a function of the initial soil moisture, the roughness of the crop cover and the inflow rate. The SurfIrri dynamic model was used to simulate the evolution of these variables over time using data measured during the 2021 irrigation season at the experimental plot described above.

The model was then forced with distance-based cutoff ranging from 60 to 100% of the plot length ($\delta x = 5\%$) to simulate the use of a water sensor at these different positions (WS_x) (Fig.4a). For each WS_x , the application efficiency (AE) and the requirement efficiency (RE) were computed. The position of the WS_x sensor was considered optimal if the simulation resulted in the highest application efficiency while ensuring that the total available soil water was filled ($RE = 100\%$). The operation was repeated for each of the thirteen irrigation events over the season, so that each date was matched by a set of optimal cutoff distance and time (WS_x, Tco).

Inflow rates can be highly variable from one irrigation event to another, due to the farmer's practices (distribution of flow rates within the farm, absence of measurement tools), or to water allocation restrictions which can be regular (official WUA calendars) or exceptional (e.g. restrictions of 25% by drought decree in August 2022). The aim was then to compare the scenarios of irrigation cut-off control when faced with the variability of the inflow rate (Fig.4b). To this end, we forced the SurfIrri model with the optimal conditions previously calculated with initial inflow rate (Qi), so that irrigation cutoff was controlled by: i) the sensor optimally positioned lengthwise throughout the season on the one hand ii) the corresponding optimal cutoff time on the other hand. The effect of inflow rate variability on irrigation performance was then tested for both scenarios by first increasing the applied flow rates by 30% ($Qi + 30$), then decreasing them by 30% ($Qi - 30$).

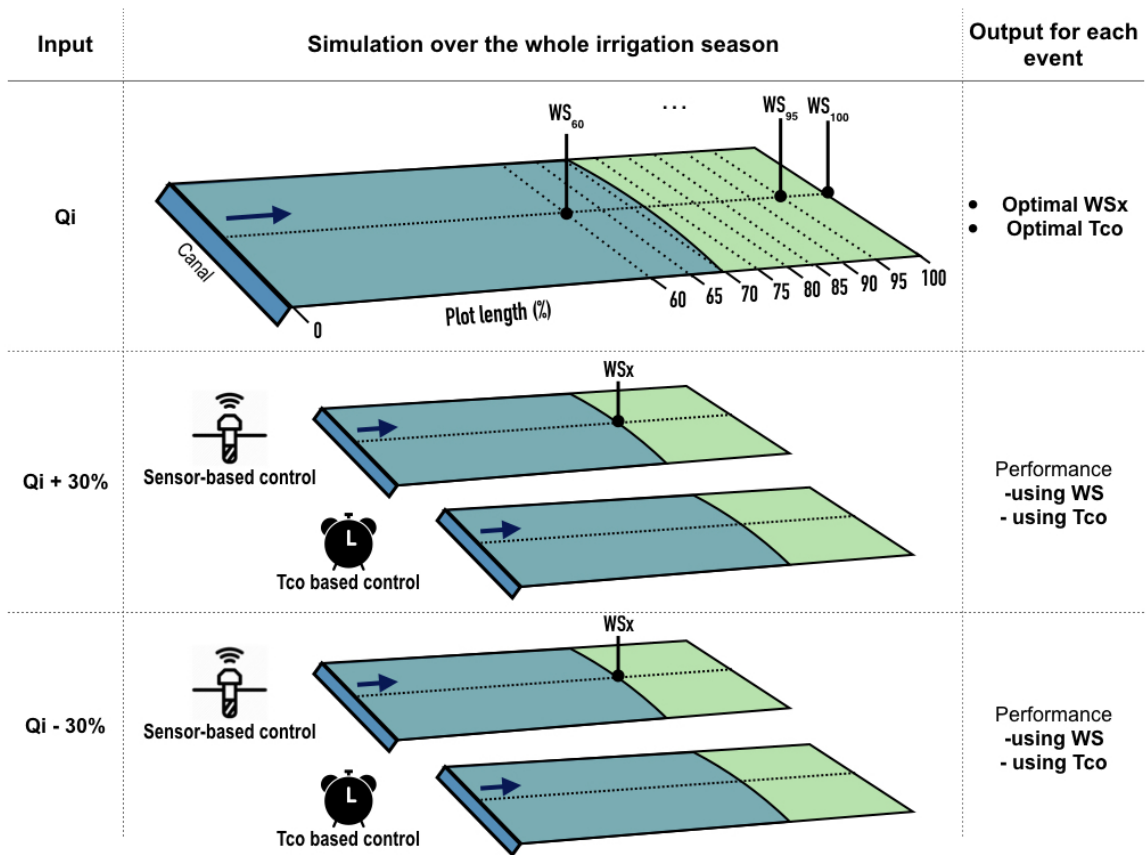


Fig. 4. Method for the search of the optimum irrigation cutoff times and distances, and the evaluation of the changes in performance depending on the water management scenario.

RESULTS

Search for the optimal sensor position over the course of the irrigation season

The results of the search for optimal irrigation distance and cutoff times over the course of the irrigation season are presented in Table 3. The integrated model allowed the continuous simulation of the evolution of the Manning's roughness coefficient (n) and soil moisture (θ) variables over time, and the initial conditions for each irrigation event of the season are provided below. The measured inflow rates (Q_i) were in the range of 100 to 180 $l.s^{-1}$ ($\sigma=19.2 l.s^{-1}$, $CV = 14\%$), which indicated a high degree of inter-event variability. Roughness (n), simulated as a function of vegetation state, ranged between 0.29 and 0.35 $s.m^{-1/3}$ over the growing season ($\sigma=0.02 s.m^{-1/3}$, $CV = 6\%$).

The temporal variability of roughness was mainly explained by the three mowing operations that took place on June 9, July 27 and September 17. The highest values were found for mature hay, and the lowest for freshly mown hay. Finally, simulation results gave an initial moisture content (θ_i) ranging from 0.16 to 0.26 $m^3 \cdot m^{-3}$ ($\sigma=0.03 m^3 \cdot m^{-3}$, $CV = 13\%$). The highest soil moisture levels, closer to field capacity ($\theta_{FC} = 0.28$), were found in autumn and spring, or when irrigation frequency was higher. Conversely, the lowest moisture contents, closer to the wilting point ($\theta_{WP} = 0.12$), were found when irrigation events were more widely spaced, and even more so during the dry season from June to September.

Simulation of the evolution of the initial parameters over time allowed to determine the optimal scenarios, i.e. those for which the application efficiency (AE) was maximum while ensuring the complete filling of the total available soil water ($RE = 100\%$). The optimum position of the water sensor (WS_x) was found ranging between 80% and 90% of the length of the field. The corresponding optimal cutoff times showed a rather wide range from 2 to 4.6 hours ($\sigma = 0.65hr$, $CV = 20\%$). Under these conditions, the requirement efficiency reached 100% for all events, and the average application efficiency of the season was 28%, with AE ranging from 9% to 41% depending on the irrigation event.

TABLE 3. Evaluation of optimal cutoff time and sensor position lengthwise the field over the irrigation season.

Irrigation sch.	$Q_i (l \cdot s^{-1})$	$n (s \cdot m^{-1/3})$	$\theta_i (m^3/m^3)$	Optimal $T_{co}(hr)$	Optimal $WS_x(\%)$	$RE(\%)$	$AE(\%)$
30/03/21	158	0.344	0.172	2.63	85	100	39
12/04/21	120	0.349	0.232	3.67	85	100	16
21/04/21	104	0.350	0.252	4.62	90	100	9
27/05/21	159	0.350	0.167	2.60	85	100	41
16/06/21	158	0.294	0.162	2.79	90	100	40
28/06/21	151	0.316	0.186	2.73	85	100	34
08/07/21	131	0.336	0.206	3.63	90	100	23
16/07/21	178	0.346	0.206	2.08	80	100	32
01/08/21	127	0.298	0.168	3.94	90	100	34
12/08/21	133	0.318	0.214	3.43	90	100	22
20/08/21	128	0.332	0.219	3.21	85	100	23
29/08/21	142	0.345	0.210	2.97	85	100	25
23/09/21	132	0.307	0.206	3.48	90	100	24

Optimal sensor positioning WS_x was determined as resulting in the best AE while ensuring $RE = 100\%$.

Comparison of border irrigation performance using sensor-based cutoff with usual practices

The performance of border irrigation obtained by optimising the position of the sensor was compared with the performance simulated on the basis of usual practices (Fig.5). The "actual management" scenario thus represents the application efficiencies and applied irrigation volumes based on irrigation times measured under real field conditions, while the "sensor-based management" scenario involves the use of a sensor optimally positioned lengthwise the field, which controls the irrigation cut-off for each event. The simulation results showed that in both scenarios, the water requirements to fill the *TAW* were met, so that *RE* was 100% at the end of each event of the season in both situations. Nevertheless, the sensor-based management led to application efficiencies equal to or higher than those achieved with actual management for all events. As the water depths ultimately stored in the root zone were otherwise the same, these differences in *AE* resulted in large disparities in the irrigation volumes applied, which were always equal or lower with the use of the sensor. On average, *AE* was 56% higher and applied volumes reduced by 33% over the irrigation season in the sensor-based management scenario.

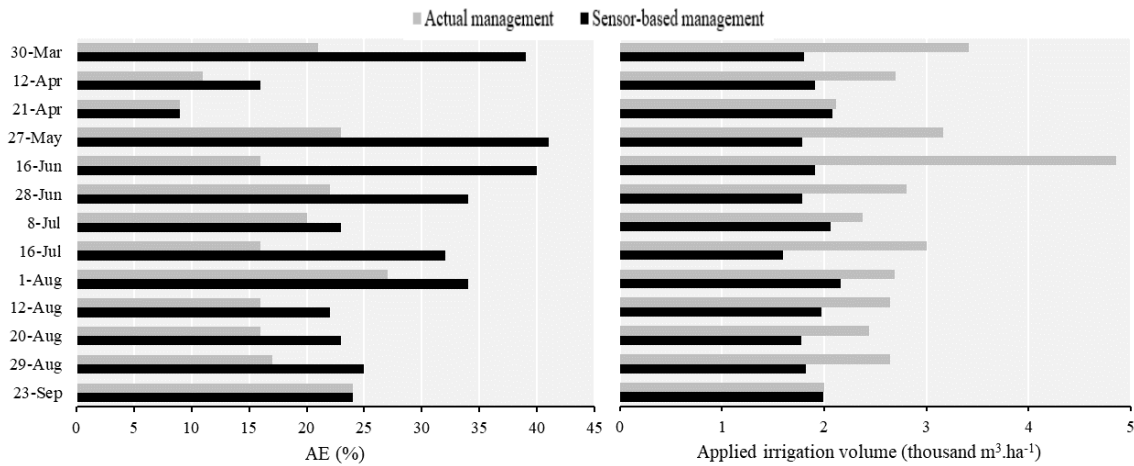


Fig. 5. Simulated effects of sensor-based management on the performance of border irrigation compared with current practices.

Impacts of inflow rate variability on irrigation performances depending on management scenarios

Finally, the distinction was made between the sensor-based and the time-based cutoff management scenarios and we simulated the impacts of variability in inflow rates on irrigation performance in both cases (Fig.6). The initial inflow rate (Q_{ini}) corresponded to the inflow rates measured over the course of the irrigation season. Applying the optimal cutoff time (*optimal T_{co}*) and sensor positioning (*optimal WS_x*) in these conditions (Table 3) resulted in an average *AE* of 28% and an average *RE* of 100%.

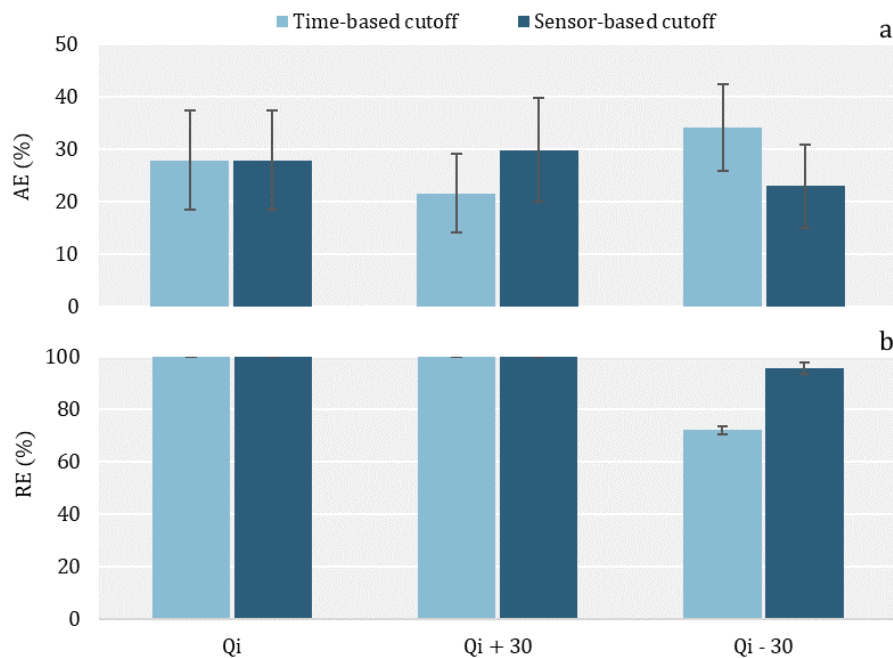


Fig. 6. Sensitivity of application efficiency (a) and requirement efficiency (b) to inflow rate variability depending on management scenarios. Q_i , Q_{i+30} and Q_{i-30} are respectively the inflow rates initially measured in field, increased by 30% and decreased by 30%. The values represent average performance and the error bars the standard deviation over the irrigation season.

By increasing inflow rates by 30% (Q_{i+30}): i) time-based cutoff (*optimal T_{co}*) led to an average decrease in *AE* of 6% over the season, and *RE* remained equal to 100%; ii) sensor-based cutoff (*optimal WS_x*) slightly increased average *AE* (+2%) over the season, and *RE* remained equal to 100%.

By decreasing the inflow rates by 30% (Qi_{-30}): i) time-based cutoff increased average AE by 6% but did not allow to meet soil water requirements and average RE dropped by almost 30% ; ii) sensor-based cutoff led to lower AE (-5%) on average but allowed the soil water requirements to be reasonably met with an average RE of 96% over the irrigation season.

DISCUSSION

The SurfIrri integrated model allowed us to simulate temporal hydrodynamic variations in the border irrigation of a permanent meadow over the course of the season. By coupling a surface water flow simulator with crop and soil water models, we were able to estimate variations in infiltration and Manning's roughness coefficient over time. The results showed that initial soil moisture deviated noticeably from its mean over the course of the season, with values that were close to characteristic humidities. This behaviour is consistent with the dynamics of volumetric water content measured in the field under similar conditions by Merot et al. (2008b). The variations in Manning's roughness coefficient, estimated from the cover LAI, showed a relatively small deviation from their mean of 0.33. The evolution of the n faithfully reflected the development stages of a permanent pasture, with maximum values reached at the time of hay maturity, and minimum values when the grass was short, following mowing operations. The results coincide with the values of n obtained by Robertson et al. (2004) ranging from 0.20 to 0.36 for a pasture, without succeeding in identifying a relationship between the height of the vegetation and n , and those obtained by Bader et al. (2010) ranging from 0.20 to 0.43 under similar experimental conditions. We suppose that the relatively high minimum of n obtained by simulation could reflect a roughness that is actually higher in the days following mowing, perhaps due to the presence of crop residues on the surface of the field. However, Xu et al. (2019) showed that temporal variations of this magnitude in Manning's roughness coefficient could have significant consequences on the performance of border irrigation. Ultimately, these results highlight the intra-seasonal heterogeneity of the initial conditions impacting the performance of border irrigation, and the importance of integrating their dynamics when searching for optimisation of practices.

The integration of this temporal variability of factors affecting surface water flow (Q_i, n, θ_i) made it possible to determine optimal irrigation management scenarios that evolve over the course of the season. The results showed that under these conditions, the optimal cutoff time was highly variable, with durations that could double from one irrigation event to the other. A comparison of the successive irrigation events of July 16 and August 01 provides a good illustration of the combination of factors affecting this optimum from one irrigation to the next: i) hay mowing led to a reduction in Manning of almost 15%, ii) the time interval between the two irrigations due to mowing during the dry season led to a reduction in θ_i of almost 20%, iii) the inflow rate dropped by 50%. To achieve equivalent levels of performance, the optimal T_{co} on August 01 would be almost twice longer than the T_{co} simulated 15 days earlier. The results also showed that the optimal sensor position lengthwise the field was less sensitive to these seasonal changes, WS_x ranging from 80% to 90%. These results are in line with the field experience of farmers in the area, who are well aware that on the same field the water velocity can differ greatly from one irrigation to the next. This variability also illustrates how difficult it is for farmers to manage these flows accurately. The use of the SurfIrri model, through the production "optimal management tables", could thus represent a valuable decision-making tool for optimising border irrigation strategies. Further studies should include statistical analyses in order to identify a simplified relationship that would allow the optimum position of the sensor to be estimated on the basis of simple field inputs (e.g. water level at the weir, canopy height, soil water status).

The potential of a sensor-based cutoff strategy was assessed by simulating the performance of border irrigation under various scenarios. Comparison with actual practices showed that sensor-based management should make it possible to significantly improve application efficiency while maintaining requirement efficiency equal to 100%, thus making it possible to reduce the volumes of irrigation applied by around 30% without affecting crop production. The average AE obtained by simulating traditional practices (18%) was in the range described in the literature for the region (Oliosio et al. 2013; Mailhol and Merot 2008). Furthermore, the analysis of the sensitivity of irrigation performance to inflow rates variation depending on the management scenarios showed

that the use of an in-field sensor would reduce performance gaps in comparison with the use of a cutoff time optimised under initial conditions. With increased inflow rates, the water front reached the sensor position faster, thus reducing irrigation time with regard to cutoff time which resulted in over-irrigation. When inflow rates were lowered, the water front took longer to reach the sensor, which allowed the total available water to be properly refilled, unlike the use of a cutoff time. The use of in-field water detection sensors therefore appears to be beneficial compared with traditional cutoff time, insofar as it allows better flexibility to the intra- and inter-event unpredictability of surface irrigation.

Conceptually, this study provides elements for better understanding irregular and generally low values of border irrigation application efficiency in field conditions, beyond optimised scenarios. It is interesting to see how the variability of initial conditions, certainly associated with labour constraints, may lead the farmer to frequently over-irrigate in order to overcome the risk of water requirements that would not be satisfied. This pattern was similarly observed in other contexts (Masseroni et al. 2022). From this perspective, and because models are unable to predict everything, the development of new technologies such as wireless sensor networks (Hamami and Nassereddine 2020) represents an opportunity for surface irrigation management, which has been relatively forgotten by precision agriculture. This study highlights the benefits of using a real-time surface water detection sensor to support farmers' decision making for border irrigation cutoff. Future studies should investigate the possibilities of data acquisition to adjust the model in real time, for example by positioning several sensors to validate surface water advance. Beyond this binary data, the production of more complex data such as hydraulic pressure or soil moisture in real time represent many opportunities to improve the parameterisation of surface irrigation models and the optimisation of irrigation strategies closer to actual field conditions.

Although this work represents a step forward in taking into account the temporal dynamics of border irrigation and exploring new paths for its management, the authors are aware that the optimisation of irrigation efficiency at plot level is subject to limitations. Several studies have emphasised the potential side effects of water-saving measures (Grafton et al. 2018; Lankford

et al. 2020), some of which represent a serious risk for the Crau irrigated territory. Water flows considered as "losses" (tailwater runoff, deep percolation) when evaluating application efficiencies at field level may indeed be considered, depending on the scale and perspective, as beneficial return flows. For instance, the Crau aquifer is mainly recharged by border irrigation percolation water flows (SINERGI 2020; Olioso et al. 2013; Renault 1993), and runoff flows may be reused at farm or irrigation scheme level. Such observations, which put into perspective the low application efficiencies described earlier, emphasize the need for further research prior to the adoption of new practices. A multi-scale and multi-criteria evaluation of the changes in performance induced by the generalisation of a sensor-based cutoff, achievable using the SurfIrri model, should make it possible to provide recommendations on integrated management strategies.

CONCLUSION

Sensor-based cutoff would benefit border irrigation performance, compared with surface water management without decision support, but also with time-based cutoff which is usually optimised by simulation. Our results suggest that the combined use of an integrated surface irrigation model, which simulates the evolution of initial soil moisture and roughness conditions over the season, with a real-time water detection sensor in the field could improve average application efficiency by more than 50%, while maintaining the requirement efficiency at 100%. This improvement would represent a water saving of 33% on surface irrigation volumes at field level under the conditions of our experiment, which is representative of the practices of a large irrigated area. Compared with a cutoff time optimised by simulation, the use of an in-field sensor-based cutoff makes it possible to limit performance gaps arising from variability or uncertainty in the initial irrigation conditions. The rapid development of new wireless sensor network technologies for agriculture thus represents a real opportunity to optimise surface irrigation management, which until now has been relatively forgotten by digital innovation. Future studies should seek to assess the impact of adopting such technologies at different spatial scales, and with regard to different criteria, in order to avoid potential non-beneficial side effects.

Data Availability Statement

Some or all data, models, or code that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request (list items).

Acknowledgments

This paper is part of the first author's PhD project, funded by the CIRAD and the Occitanie Region (France). The work was carried out as part of HubIS project (EU's PRIMA programme 2019, grant ANR-19-P026-0006-02). We are grateful to the Domaine du Merle for participating in the project, and to François Charron for generously sharing data and experience.

REFERENCES

- Andrieux, P. (1981). "Etudes des sols du Domaine du Merle. Méthodes et premiers résultats." *Mémoire de D.D.A. ENSAM*.
- Anwar, A. A., Ahmad, W., Bhatti, M. T., and Ul Haq, Z. (2016). "The potential of precision surface irrigation in the Indus Basin Irrigation System." *Irrigation Science*, 34(5), 379–396.
- Bader, J.-C., Saos, J.-L., and Charron, F. (2010). "Modèle de ruissellement, avancement et infiltration pour l'irrigation à la planche sur un sol recouvrant un sous-sol très perméable." *Hydrological Sciences Journal*, 55(2), 177–191.
- Bautista, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., and Schlegel, J. (2009). "Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR." *Agricultural Water Management*, 96(7), 1146–1154.
- Burt, C. M., Clemmens, A. J., Strelkoff, T., Solomon, K., Bliesner, R., Hardy, L., Howell, T. A., and Eisenhauer, D. (1997). "Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123, 20.
- Fabre, J., Louchart, X., Moussa, R., Dagès, C., Colin, F., Rabotin, M., Raclot, D., Lagacherie, P., and M., V. (2010). "Openfluid: a software environment for modelling fluxes in landscapes.
- Gillies, M. H. and Smith, R. J. (2015). "SISCO: surface irrigation simulation, calibration and optimisation." *Irrigation Science*, 33(5), 339–355.
- González-Cebollada, C., Moret-Fernández, D., Buil-Moure, I., and Martínez-Chueca, V. (2016).

- “Optimization of Field Topography in Surface Irrigation.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(8), 04016026.
- Grafton, R. Q., Williams, J., Perry, C. J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall, B., Wheeler, S. A., Wang, Y., Garrick, D., and Allen, R. G. (2018). “The paradox of irrigation efficiency.” *Science*, 361(6404), 748–750.
- Hamami, L. and Nassereddine, B. (2020). “Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review.” *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105782.
- Lankford, B., Closas, A., Dalton, J., López Gunn, E., Hess, T., Knox, J. W., van der Kooij, S., Lautze, J., Molden, D., Orr, S., Pittock, J., Richter, B., Riddell, P. J., Scott, C. A., Venot, J.-p., Vos, J., and Zwarteveen, M. (2020). “A scale-based framework to understand the promises, pitfalls and paradoxes of irrigation efficiency to meet major water challenges.” *Global Environmental Change*, 65, 102182.
- Mailhol, J. C. and Merot, A. (2008). “SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region.” *Irrigation Science*, 26(4), 289–302.
- Masseroni, D., Gangi, F., Galli, A., Ceriani, R., De Gaetani, C., and Gandolfi, C. (2022). “Behind the efficiency of border irrigation: Lesson learned in Northern Italy.” *Agricultural Water Management*, 269, 107717.
- Merot, A., Bergez, J. E., Capillon, A., and Wery, J. (2008a). “Analysing farming practices to develop a numerical, operational model of farmers’ decision-making processes: An irrigated hay cropping system in France.” *Agricultural Systems*, 98(2), 108–118.
- Merot, A., Wery, J., Isbérie, C., and Charron, F. (2008b). “Response of a plurispecific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometers.” *European Journal of Agronomy*, 28(1), 8–18.
- Morris, M. R., Hussain, A., Gillies, M. H., and O’Halloran, N. J. (2015). “Inflow rate and border irrigation performance.” *Agricultural Water Management*, 155, 76–86.
- Nie, W.-B., Dong, S.-X., Li, Y.-B., and Ma, X.-Y. (2021). “Optimization of the border size on the irrigation district scale – Example of the Hetao irrigation district.” *Agricultural Water*

- Management*, 248, 106768.
- Nie, W.-B., Li, Y.-B., Zhang, F., and Ma, X.-Y. (2019). "Optimal discharge for closed-end border irrigation under soil infiltration variability." *Agricultural Water Management*, 221, 58–65.
- Oliosio, A., Lecerf, R., Baillieux, A., Chanzy, A., Ruget, F., Banton, O., Lecharpentier, P., Trolard, F., and Cognard-Plancq, A.-L. (2013). "Modelling of Drainage and Hay Production over the Crau Aquifer for Analysing Impact of Global Change on Aquifer Recharge." *Procedia Environmental Sciences*, 19, 691–700.
- Pereira, L. S. and Gonçalves, J. M. (2018). *Surface Irrigation*. Oxford University press, Oxford, England.
- Pereira, L. S., Oweis, T., and Zairi, A. (2002). "Irrigation management under water scarcity." *Agricultural Water Management*, 57(3), 175–206.
- Pramanik, M., Khanna, M., Singh, M., Singh, D., Sudhishri, S., Bhatia, A., and Ranjan, R. (2022). "Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system." *Smart Agricultural Technology*, 2, 100032.
- Renault, D. (1993). "Modernisation de l'irrigation de surface : acquis et perspectives." *La Houille Blanche*, 79(2-3), 175–182.
- Robertson, D., Wood, M., and Wang, Q. J. (2004). "Estimating hydraulic parameters for a surface irrigation model from field conditions." *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44(2), 173.
- Salahou, M. K., Jiao, X., and Lü, H. (2018). "Border irrigation performance with distance-based cut-off." *Agricultural Water Management*, 201, 27–37.
- Saos, J., Belaud, G., Charron, F., and Le Goulven, P. (2006). "Quantification des flux d'eau en irrigation gravitaire en crau-rapport final." *UMR G-Eau-Supagro*. 270p.
- SINERGI (2020). "Analyse prospective de la sensibilité de la nappe de la Crau aux conditions de recharge et de prélèvements pour définir les termes quantitatifs d'une gestion durable de la ressource à l'horizon 2050." *Rapport technique*, SYMCRAU.
- Vandôme, P., Moinard, S., Brunel, G., Tisseyre, B., Leauthaud, C., and Belaud, G. (2023). "A low

- cost sensor to improve surface irrigation management.” *Precision Agriculture '22*, Wageningen Academic Publishers.
- Venot, J. P., Kuper, M., and Zwarteveen, M. (2017). *Drip Irrigation for Agriculture. Untold stories of efficiency, innovation and development*. Earthscan Studies in Water Resource Management. Taylor & Francis Group, routledge edition.
- Villafaña, S. R. (2018). “Modélisation spatio-temporelle des flux d’eau à l’échelle d’un périmètre irrigué par gravité.” *Report no.*, Université de Montpellier.
- Walker, W. (2003). “Sirmod iii-surface irrigation simulation, evaluation and design (guide and technical documentation).” *Logan, Utah State University. 130p.*
- Xu, J., Cai, H., Saddique, Q., Wang, X., Li, L., Ma, C., and Lu, Y. (2019). “Evaluation and optimization of border irrigation in different irrigation seasons based on temporal variation of infiltration and roughness.” *Agricultural Water Management*, 214, 64–77.

4.4 Automatisation de l'irrigation gravitaire d'un petit périmètre irrigué : à qui profite le "clic" ?

Un modèle pour l'évaluation multi-critère et multi-échelle

4.4.1 Contexte et objectifs

Les résultats de la section 4.3 ont montré que le pilotage de l'irrigation à la planche basé sur un capteur au champ communiquant pouvait permettre des gains d'efficience à l'échelle de la parcelle, par rapport aux pratiques actuelles des agriculteurs. Cette approche, bien qu'originale par son intégration des dynamiques temporelles des conditions initiales et son ouverture vers de nouvelles pratiques d'irrigation, s'accompagne de certaines limites inhérentes aux méthodes classiques d'évaluation des performances de l'irrigation. De fait, i) l'échelle parcellaire restreint l'étude à l'évaluation d'un système limité pour lequel tout volume non stocké dans la zone racinaire est considéré comme une perte, sans prendre en considération les potentielles externalités bénéfiques à d'autres échelles (exploitation, périmètre irrigué, territoire et bassin versant voire au delà dans le cas des transferts inter-bassins); ii) l'analyse seule des flux d'eau restreint la compréhension du système vis à vis d'autres usages (services écosystémiques, reutilisation en aval, etc.). Or l'amélioration de l'efficience à petite échelle n'est pas nécessairement synonyme d'économies d'eau à plus large échelle (Grafton et al., 2018). Ce paradoxe appelle à reconsidérer les méthodes classiques d'évaluation des performances de l'irrigation et introduit par ailleurs la question de la perspective, ou des "*motives*" conceptualisés par Lankford et al. (2020), qui revient à se demander : à qui, ou à quoi profitent les flux d'eau ?

A la lumière de ces considérations, nous proposons dans la section 4.4 une preuve de concept afin de i) mettre en évidence l'importance de décroiser les échelles, et ii) observer dans quelle mesure la connaissance des processus élémentaires (flux d'eau, cultures, équipements et règles de décision) peut être intégrée

en vue d'évaluer ces effets, et explorer des compromis ou des synergies dans les stratégies d'adaptation des systèmes irrigués. Dans cette optique, nous expérimenterons le potentiel d'une méthode multi-échelle et multi-critère pour analyser les impacts de l'adoption des technologies développées pour la gestion de l'irrigation de surface. Nous chercherons à définir une diversité d'indicateurs reflétant les différentes dimensions (hydrauliques, agronomiques, socio-économiques) et les différentes échelles et perspectives (usages des flux d'eau dans le temps et dans l'espace) d'un système irrigué. Nous combinerons données de suivi et modélisation numérique d'un petit périmètre irrigué afin de produire les variables utiles aux indicateurs selon deux scénarios de pilotage de l'irrigation gravitaire. Nous discuterons enfin de cette approche au regard des résultats obtenus.

Pour répondre au contexte spécifique de la Crau, l'analyse systémique préalablement réalisée (Chapitre 2) nous permet de faire les hypothèses suivantes : i) les pratiques d'irrigation du système de culture foin de Crau produisent des volumes d'eau excédentaires dont la qualité (faible salinité, absence de résidus de pesticides et fertilisants) est compatible avec leur ré-utilisation ; ii) à l'échelle de l'exploitation ou du réseau d'irrigation tertiaire, cela se traduit par la considération des volumes ruisselés en colature comme potentiellement ré-utilisables selon les configurations ; iii) à l'échelle du territoire irrigué, cela se traduit par la considération des volumes percolés en profondeur comme potentiellement utiles à la recharge de l'aquifère.

4.4.2 Matériel et méthode

Simulation de l'irrigation de surface à l'échelle d'un périmètre irrigué

Le modèle SurfIrr, décrit dans la section 4.3 (*Material and methods*), permet la représentation numérique de l'espace sous la forme d'unités spatiales (parcelles et canaux) inter-connectées grâce à la plateforme Openfluid (Fabre et al., 2010). Cette discrétisation spatiale nous donne la possibilité de simuler les flux d'eau à des échelles supérieures intégrant la valorisation de volumes "inutiles" pour certaines unités, mais utiles pour d'autres. Par ailleurs, la plateforme per-

met d'inclure différents indicateurs généralement non considérés lorsqu'on cible uniquement l'efficacité d'application à l'échelle de la parcelle. Nous avons donc développé le simulateur pour explorer ces questions de changement d'échelle et évaluer la pertinence (selon divers critères) de différentes stratégies d'adaptation d'un périmètre irrigué. Cette réflexion est illustrée à partir d'un petit système irrigué décrit ci-dessous.

Systeme étudié

Un petit périmètre irrigué pilote, représentant un secteur d'irrigation tertiaire de sept hectares découpé en sept parcelles irriguées à la planche depuis un canal béton à surface libre, a constitué le système d'étude (Fig.4.4). Son suivi agro-hydraulique a été réalisé tout au long de la saison d'irrigation 2021, de Mars à Octobre. Les calendriers d'irrigation (dates, durées et débits injectés) et de fauche ont été mesurés pour chacune des sept parcelles du secteur, selon le protocole décrit dans la section 4.3 (*Monitoring of input variables*). Les données climatiques ont été fournies par la station météorologique du Merle à proximité du périmètre (43.642532N, 4.993516E). Les rendements ont été estimés à chacune des trois fauches par comptage des balles de foin par parcelle et pesée en remorque. Le prix moyen du foin de Crau pour la période 1990-2020 (Ibgui, 2021) a été utilisé pour le calcul des indicateurs économiques. Le temps de travail dédié à l'irrigation a été estimé en le réduisant à deux opérations : i) le pilotage durant le tour d'eau, et ii) la préparation du tour d'eau. Le temps de travail nécessaire au pilotage durant le tour d'eau a été mesuré en chronométrant à la fois le temps passé par l'irrigant lancer l'irrigation, et le temps passé à la parcelle à l'occasion de ses aller-retours pour vérifier l'avancée de la lame d'eau, et enfin le temps pour actionner la vanne à la fin de l'irrigation de la parcelle (section 3.2). Le temps de travail nécessaire à la préparation du tour d'eau a été mesuré en chronométrant le temps passé par l'irrigant pour ré-armer toutes les vannes martelières du périmètre irrigué entre deux tours d'eau. La mesure du temps de travail nécessaire à ces deux opérations a été réalisée pour l'ensemble du périmètre à l'occasion d'un tour d'eau.



FIGURE 4.4 – Système d'étude : un secteur tertiaire d'irrigation gravitaire du foin.

Les hypothèses suivantes ont par ailleurs été faites :

1. L'extrapolation du temps de travail à l'échelle de la saison a été faite en considérant que les durées mesurées pour la gestion de l'irrigation du périmètre à l'occasion d'un tour d'eau étaient équivalentes au temps de travail moyen de l'irrigant par tour d'eau. De fait, malgré des tours d'eau plus ou moins "faciles", le temps de travail nécessaire à l'irrigation de l'ensemble du secteur est relativement homogène au cours de la saison selon l'irrigant. Le temps de trajet lié aux aller-retours de l'irrigant sur la parcelle, bien que non négligeable, n'a pas été considéré en raison de la difficulté d'acquisition et d'extrapolation de cette variable.
2. L'ancienneté des parcelles, dont dépend l'épaisseur de sédiments déposés par irrigation, est équivalente pour les sept parcelles étudiées. En effet, les campagnes d'échantillonnage (Andrieux, 1981) n'ont pas montré de variabilité pédologique entre les parcelles du périmètre irrigué considéré.

La texture et l'épaisseur de l'horizon limoneux superficiel constituant la réserve utile du sol ont donc été considérées comme homogènes pour l'ensemble du périmètre irrigué étudié.

3. Les dimensions des parcelles ont été approchées par rectangularisation (optimisation d'indice de forme (Oksanen, 2013)) afin de produire les attributs de longueur et de largeur nécessaires au modèle. Les planches du secteur ayant été re-nivelées récemment, la pente du secteur a été considérée régulière et uniforme dans le sens NE-SO pour l'ensemble du secteur.
4. Les propriétés hydrauliques d'infiltration des sols ont été considérées comme homogènes pour toutes les parcelles. Les valeurs de conductivité hydraulique et de succion capillaire au front d'humectation obtenues pour l'une des parcelles du secteur par calage avec le modèle Green-Ampt ont été retenues (section 4.3, *Determination of the parameters*).

Une synthèse des paramètres parcellaires retenus pour la modélisation du périmètre irrigué est donnée en table 4.1.

TABLE 4.1 – Résumé des paramètres parcellaires utilisés pour la simulation

ID	Width (m)	Lenght (m)	I (m/m)	Z (mm)	θ_{FC} (m^3/m^3)	θ_{WP} (m^3/m^3)	θ_s (m^3/m^3)	H_f (m)	Ks ($m.s^{-1}$)	LAIo ($m^2.m^{-2}$)	LAI _{max} ($m^2.m^{-2}$)
p7	37	200	$3.61.10^{-3}$	650	0.28	0.12	0.5	0.56	$8.08.10^{-6}$	2	7.7
p6	41	196	$3.61.10^{-3}$	650	0.28	0.12	0.5	0.56	$8.08.10^{-6}$	2	7.7
p5	47	162	$3.61.10^{-3}$	650	0.28	0.12	0.5	0.56	$8.08.10^{-6}$	2	7.7
p4	40	208	$3.61.10^{-3}$	650	0.28	0.12	0.5	0.56	$8.08.10^{-6}$	2	7.7
p3	42	208	$3.61.10^{-3}$	650	0.28	0.12	0.5	0.56	$8.08.10^{-6}$	2	7.7
p2	32	212	$3.61.10^{-3}$	650	0.28	0.12	0.5	0.56	$8.08.10^{-6}$	2	7.7
p1	40	181	$3.61.10^{-3}$	650	0.28	0.12	0.5	0.56	$8.08.10^{-6}$	2	7.7

Scénarios de simulation

L'analyse s'est appuyée sur la simulation de deux scénarios de gestion de l'irrigation à la planche :

Le *scénario de référence* correspond aux pratiques d'irrigation des agriculteurs. Le calendrier d'irrigation (dates, durées, débits) et la production de foin sont ceux mesurés pendant la saison 2021. Le temps de travail dédié à l'irrigation correspond à la somme du temps nécessaire aux opérations de pilotage et de préparation du tour d'eau.

Le *scénario d'automatisation par capteur au champ* correspond à l'adoption des technologies précédemment développées pour le pilotage automatique des vannes d'irrigation par détection de la lame d'eau en bout de parcelle. Ainsi, chaque parcelle du secteur est équipée d'un capteur de détection d'eau en aval, sa position variant entre 80% et 90% de la longueur de la planche selon les épisodes d'irrigation au cours de la saison. Les positions de capteur à chaque tour d'eau sont définies à partir des résultats d'optimisation précédemment obtenus (section 4.3, table 2).

Le signal d'arrivée de la lame d'eau en bout de planche actionne la fermeture d'une vanne et indique la fin de l'irrigation de la parcelle considérée. Ainsi, si l'on considère l'irrigation de la parcelle n , l'arrivée de la lame d'eau à l'emplacement du capteur entraînera : i) la fermeture automatique de la vanne martelière n dans le canal, et par conséquent ; ii) l'arrêt de l'irrigation sur la planche n , et donc ; iii) le lancement de l'irrigation sur la planche $n+1$. Les conditions du scénario d'automatisation sont donc identiques à celles du scénario de référence, à l'exception des durées d'irrigation qui sont conditionnées par le système d'automatisation - i.e. le rapport entre la position du capteur et la vitesse d'avancement du ruissellement à chaque tour d'eau - et du temps de travail de l'irrigant qui s'affranchit de l'opération de pilotage durant le tour d'eau. Le module de culture du modèle SurfIrri ne fournissant pas directement la production de biomasse (bien que celle-ci soit fortement corrélée avec le LAI qui lui est calculé), nous faisons l'hypothèse que les rendements en foin seront équivalents à ceux mesurés pour le scénario de référence, à condition que la satisfaction des besoins en eau soit supérieure

ou égale à celle de référence, les autres facteurs de production de biomasse étant égaux par ailleurs (fréquence d'irrigation, climat, dates de fauche).

La simulation a été réalisée pour les deux scénarios sur l'ensemble du périmètre irrigué, c'est-à-dire les sept parcelles, et au cours de la saison d'irrigation 2021, cumulant treize tours d'eau. Ainsi, un total de 91 épisodes d'irrigation a été simulé pour chaque scénario.

Indicateurs de performance

Plusieurs indicateurs de performance ont été calculés en vue d'analyser les résultats pour la comparaison entre les scénarios de gestion de pilotage.

La répartition moyenne des volumes d'irrigation représente les moyennes des différentes composantes du bilan hydrique (V_{app} - volumes d'irrigation appliqués, V_{rz} - volumes stockés dans la zone racinaire, V_{ro} - volumes ruisselés en colature et V_p - volumes percolés en profondeur) obtenues par simulation à l'échelle du périmètre irrigué pour chaque tour d'eau de la saison d'irrigation (treize tours d'eau). Le volume requis V_{req} représente le déficit hydrique du sol avant chaque irrigation et a été calculé avant chaque tour d'eau comme la différence entre la réserve utile (TAW) et la réserve en eau instantanée du sol (TAW_i) :

$$V_{req} = TAW - TAW_i$$

L'évaluation du niveau de satisfaction des besoins en eau a été réalisée comme précédemment par calcul de la "*requirement efficiency*" (section 4.3, *materials and methods*) pour chaque parcelle et à chaque tour d'eau. Cet indicateur, calculé comme le rapport entre le volume stocké dans la zone racinaire au terme de l'irrigation et le volume requis avant irrigation, donne des valeurs comprises entre 0 ($V_{rz} = 0$) et 1 ($V_{rz} = V_{req}$) :

$$RE = \frac{V_{rz}}{V_{req}}$$

Le calcul de la *requirement efficiency* implique un déficit hydrique du sol positif avant irrigation ($V_{req} > 0$), condition toujours vérifiée dans les données expérimentales ($TAW_i < TAW$).

Finalement, l'indicateur de productivité de l'eau, tel que défini par Molden, Murray-Rust et al., 2003, a été utilisé selon l'équation générique :

$$WP = \frac{\text{Produit dérivé de l'usage de l'eau}}{\text{Apport en eau}}$$

Compte tenu du fort déficit hydrique climatique durant la saison culturale (Fig.2.6, section 2.2), nous pouvons raisonnablement supposer que le rendement des prairies, et donc la productivité de l'eau, seraient proches de zéro en l'absence d'irrigation. Aussi nous avons calculé la productivité de l'eau d'irrigation, qui a été déclinée selon différents critères en faisant varier le numérateur pour obtenir les productivités brutes de l'eau agricole (WPa) et économique (WPe) :

$$WPa = \frac{Y}{\text{Apport en eau}}$$

$$WPe = \frac{PB}{\text{Apport en eau}}$$

avec Y le rendement en foin pour la saison en $kg.ha^{-1}$ et PB le produit brut annuel en $euro.ha^{-1}$.

La productivité de l'eau permet également de considérer différentes perspectives hydrologiques qui peuvent se révéler lors des changements d'échelle. Nous avons cherché à illustrer ce phénomène en considérant trois situations types : i) à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation agricole ou du périmètre, aucun flux d'eau d'irrigation n'est ré-utilisable ; ii) à l'échelle de l'exploitation ou du périmètre irrigué, les flux de ruissellement en colature sont ré-utilisables ; iii) à l'échelle du territoire ou du bassin versant, les flux de percolation profonde sont ré-utilisables. Le dénominateur a ainsi été modifié en fonction des situations considérées, l'apport en eau étant défini comme le volume d'eau d'irrigation effectivement consommé, i.e. le volume d'irrigation appliqué (V_{app}) déduit des volumes potentiellement ré-utilisables (V_{ro}, V_p).

Ainsi, nous entendons par cette méthode produire une diversité d'indicateurs, traduisant différentes dimensions (agronomiques, hydrauliques, socio-économiques) du système étudié, et permettant d'en analyser les performances selon différentes échelles et perspectives.

4.4.3 Résultats

Impact de l'automatisation par capteur sur la répartition de l'eau d'irrigation

Les résultats de simulation de la répartition moyenne des flux d'eau d'irrigation à l'échelle du périmètre irrigué et selon les deux scénarios de gestion sont présentés figure 4.5 .

Au terme de la saison d'irrigation, qui a compté treize tours d'eau, les volumes d'irrigation appliqués (V_{app}) étaient de $33162 \text{ m}^3.ha^{-1}$ pour le scénario de référence et $29090 \text{ m}^3.ha^{-1}$ pour le scénario d'automatisation par capteur, soit une réduction de 12% de V_{app} en cas d'automatisation. Cela se traduit dans la figure 4.5 par la diminution des barres bleu foncé du scénario de référence au scénario d'automatisation. Dans le scénario de référence, les volumes stockés dans la zone racinaire (V_{rz}) étaient en moyenne de $6638 \text{ m}^3.ha^{-1}$ pour un volume requis (V_{req}) de $6963 \text{ m}^3.ha^{-1}$. Dans le scénario d'automatisation, V_{rz} était de $6559 \text{ m}^3.ha^{-1}$ pour un V_{req} de $6830 \text{ m}^3.ha^{-1}$. Le scénario d'automatisation a donc entraîné en moyenne une légère diminution des besoins en eau avant irrigation (-2%) et des volumes stockés dans la zone racinaire (-1%). La comparaison des volumes percolés en profondeur (V_p) montre que le scénario d'automatisation ($V_p = 22074 \text{ m}^3.ha^{-1}$) a réduit en moyenne la percolation de 6% par rapport au scénario de référence ($V_p = 23566 \text{ m}^3.ha^{-1}$). Enfin, le scénario d'automatisation a entraîné une forte diminution de plus de 90% des volumes ruisselés en colature (V_{ro}), qui étaient de $2897 \text{ m}^3.ha^{-1}$ dans le scénario de référence et de $244 \text{ m}^3.ha^{-1}$ dans le scénario d'automatisation par capteur au champ.

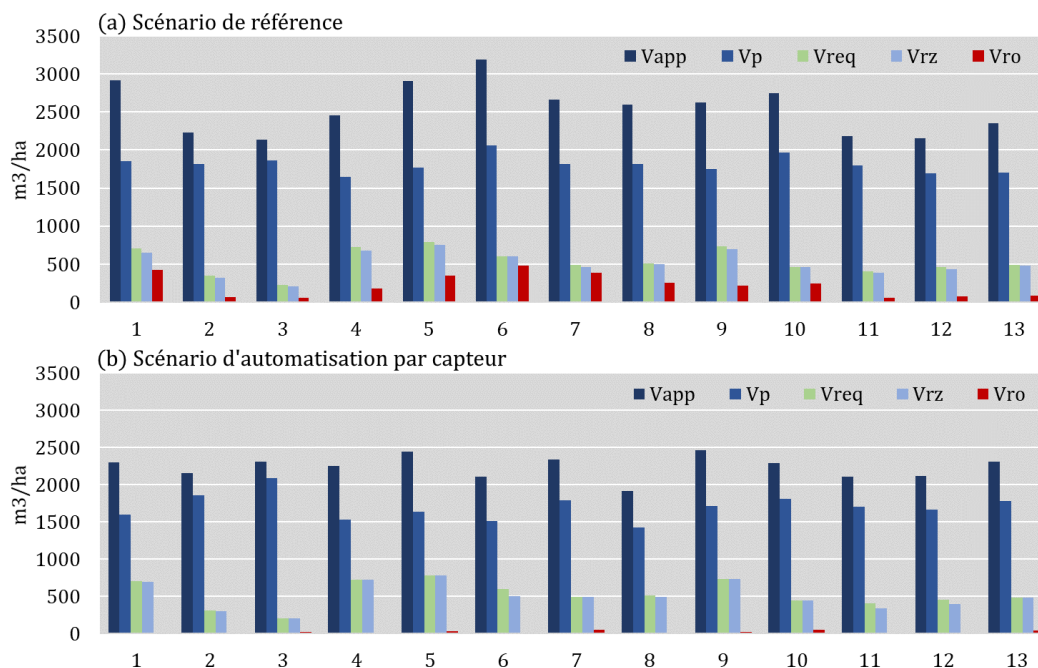


FIGURE 4.5 – Comparaison de la répartition moyenne des volumes d’irrigation au cours de la saison : a) selon le scénario de référence et b) selon le scénario d’automatisation par capteur au champ.

Analyse multi-critère de l’automatisation à l’échelle du périmètre

Les effets des deux scénarios de pilotage de l’irrigation de surface sur les critères indépendants de l’échelle d’analyse que représentent la satisfaction des besoins en eau et le temps de travail de l’irrigant sont présentés table 4.2.

TABLE 4.2 – Impacts du scénario de gestion sur la satisfaction des besoins en eau et le temps de travail.

Scenario de gestion	Requirement efficiency (%)	Temps de travail moyen (heure-homme.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Reference	$\mu = 96$ $\sigma = 8$	7.7
Automatisation	$\mu = 99$ $\sigma = 2$	0.8

Les deux scénarios de pilotage de l’irrigation ont montré un bon niveau de satisfaction des besoins en eau. Dans le cas du scénario de référence, la *requirement efficiency* (*RE*) moyenne était de 96% pour un écart type de 8%. Dans le cas du scénario d’automatisation par capteur au champ, la *RE* était de 99% pour un écart type de 2%. L’irrigation automatisée a donc globalement favo-

risé un meilleur remplissage de la réserve utile, plus régulier et plus proche de l'optimum.

Les résultats de l'estimation des temps de travail nécessaires à la gestion de l'irrigation à la planche ont donné un temps de travail moyen de 7.7 heures-homme. $ha^{-1}.an^{-1}$ dans le scénario de référence, et de 0.8 heures-homme. $ha^{-1}.an^{-1}$ dans le scénario d'automatisation, soit une différence de l'ordre du facteur dix entre les deux scénarios.

Les effets des deux scénarios de pilotage de l'irrigation sur les performances de l'irrigation en fonction des perspectives sont présentés table 4.3. Les résultats ayant montré que l'efficience de satisfaction des besoins en eau était supérieure dans le scénario de l'automatisation, et les autres facteurs de production de biomasse étant égaux par ailleurs, les rendements moyens mesurés sur le terrain ont été estimés équivalents pour les deux scénarios. Les différentes perspectives de réutilisation des flux d'eau d'irrigation ont fait varier le volume relatif d'irrigation consommé, conformément aux bilans hydriques obtenus pour les deux scénarios.

TABLE 4.3 – Mosaïque des productivités de l'eau en fonction des scénarios de pilotage de l'irrigation, des critères et des perspectives.

Flux d'eau ré-utilisable	Scenario de gestion	Rendement ($kg.ha^{-1}$)	Volume d'irrigation consommé ($m^3.ha^{-1}$)	WPa ($kg.m^{-3}$)	WPe ($€.m^{-3}$)
Aucun	Reference	10850	33162	0.33	0.065
	Automatisation	10850	29090	0.38	0.075
Ruissellement de colature	Reference	10850	30265	0.36	0.072
	Automatisation	10850	28846	0.38	0.075
Percolation	Reference	10850	9597	1.13	0.226
	Automatisation	10850	7016	1.55	0.309

Le calcul de la productivité de l'eau, selon les perspectives et les scénarios de gestion, a donné les résultats suivants : i) les variations de productivité agricole de l'eau (WPa) étaient comprises entre 0.33 et 1.55 $kg.m^{-3}$, et de la productivité économique de l'eau (WPe) entre 0.06 et 0.31 $euro.m^{-3}$; ii) dans toutes les situations étudiées, la productivité de l'eau a été améliorée dans le scénario d'automatisation de l'irrigation par capteur au champ par rapport au scénario de référence; iii) dans la perspective où aucun flux d'eau excédentaire n'était ré-utilisable, la productivité de l'eau a été améliorée de 14%; iv) dans la pers-

pective de volumes ruisselés en colature ré-utilisables, la productivité de l'eau a été améliorée de 5% ; v) enfin dans la perspective de volumes de percolation profonde ré-utilisables, la productivité de l'eau a été améliorée de 37%.

Par ailleurs, il est intéressant de constater que de manière générale la prise en compte des flux de ruissellement en colature n'a affecté que légèrement les niveaux de productivité tandis que l'intégration du caractère bénéfique des flux de percolation a engendré une augmentation de la productivité de l'eau du système étudié d'un facteur trois à quatre selon les scénarios.

4.4.4 Discussion

L'usage combiné d'un suivi agro-hydraulique et du modèle numérique *SurfIrrri* nous a permis de simuler les flux d'eau au sein d'un petit périmètre irrigué sur toute une saison d'irrigation. La comparaison de deux scénarios de gestion de l'irrigation de surface a été réalisée afin d'évaluer les changements de performance induits par l'adoption d'un système d'automatisation des vannes déclenché par détection de la lame d'eau en bout de parcelle. Les résultats ont montré que l'automatisation complète du secteur tertiaire entraînait en moyenne une réduction de 12% des volumes d'irrigation appliqués, 6% des volumes percolés en profondeur et 92% des volumes ruisselés en colature, pour des volumes stockés dans la zone racinaire équivalents, par rapport aux pratiques de pilotage actuelles. La compensation du déficit hydrique du sol avant irrigation s'est montrée légèrement plus uniforme et moins irrégulière dans le cas de tours d'eau automatisés. En outre, le système d'automatisation pourrait permettre d'alléger le temps de travail de l'ordre de 90%, en limitant le temps passé par l'agriculteur sur la parcelle pour le suivi de l'avancée de la lame d'eau et l'opération des vannes de distribution au sein du périmètre irrigué.

Afin d'élargir l'analyse au delà de la perspective "propriétaire" (Van Halsema et Vincent, 2012), qui considérerait l'intégralité des flux d'irrigation excédentaires (c'est-à-dire les volumes en colature et percolés) du système comme des pertes, une mosaïque de productivités a été calculée à partir des résultats précédents. Les variations de l'indicateur selon les perspectives peuvent s'interpréter ainsi :

- En ne considérant comme utiles que les volumes d'irrigation appliqués, ce qui correspond à l'échelle parcellaire, ou à un système (exploitation ou périmètre) ne bénéficiant pas des eaux de colature ou percolées, l'automatisation entraîne un gain de productivité de l'eau qui se traduit par une économie des volumes appliqués pour l'obtention de rendements équivalents.
- En considérant par ailleurs les volumes ruisselés en colature comme utiles, ce qui correspond à l'échelle d'une exploitation agricole ré-utilisant les eaux drainées en surface, ou à tout autre système bénéficiant du ruissellement, l'automatisation entraîne également des gains de productivité, qui bien que moindres traduisent toutefois une économie de volumes appliqués légèrement supérieure au déficit de volumes ruisselés.
- En considérant enfin les volumes percolés en profondeur comme utiles, ce qui correspond par exemple à l'échelle d'un territoire bénéficiant de la recharge de l'aquifère, l'automatisation entraîne toujours des gains de productivité, plus importants, qui se traduit par une économie de volumes appliqués supérieure au déficit de percolation.

En écho au célèbre mantra *"more crop per drop"* qui accompagne souvent le concept de productivité de l'eau, notre étude a plutôt témoigné de sa version déclinée sous la forme *"same crop less drop"*. En premier lieu, l'hypothèse simplificatrice de production de biomasse équivalente pour les deux scénarios, qui s'appuie sur les résultats montrant un remplissage de la réserve utile du sol plus efficient dans le scénario de l'automatisation (les autres facteurs de production étant égaux par ailleurs), ignore les potentiels gains de biomasse résultant de l'automatisation. Le module de culture de SurfIrrri se contente actuellement de simuler les variations de LAI, variable intermédiaire pour l'estimation des variations de la rugosité du couvert. Des résultats intéressants, intégrant la diversité botanique de la prairie et les effets du vent et de l'état hydrique du sol sur son développement, ont été obtenus par Merot, Bergez, Wallach et al. (2008) et pourraient constituer une base d'amélioration pour le modèle SurfIrrri. Pour autant, nous pouvons rappeler que l'augmentation de rendement n'était pas un objec-

tif identifié par les acteurs lors de l'élaboration du cahier des charges pour le développement du système d'automatisation. De fait, il s'agit d'un outil d'aide à la décision - et à l'opération - pour l'arrêt du tour d'eau, et non pour son déclenchement, qui est dans la majorité des cas immuable car dépendant des droits d'eau de distribution collective. Les rendements sont par ailleurs plafonnés à $11 \text{ T}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ par le cahier des charges de l'appellation d'origine "Foin de Crau". Au-delà d'une potentielle amélioration de l'uniformité d'application, le système d'automatisation n'a par conséquent ni les moyens ni la vocation d'améliorer les rendements et l'effet de son adoption sur la productivité de l'eau se traduit donc uniquement au niveau des volumes consommés. En somme, une manière d'interpréter les résultats est d'envisager le système d'automatisation comme une alternative se situant à la croisée de la tendance actuelle (*"same crop more drop"*), de l'intensification du système de culture (*"more crop per drop"*) et de l'irrigation déficitaire (*less crop less drop*).

La durée des tours d'eau du scénario d'automatisation a découlé du forçage du modèle SurfIrrri avec les positions optimales des capteurs au champ déterminées dans la section 4.3. Par conséquent, la position des capteurs n'était pas optimisée distinctement selon les dimensions des parcelles de l'ensemble du secteur. Pour aller plus loin, il serait intéressant d'évaluer la sensibilité de la position optimale du capteur aux dimensions (largeur et longueur) de la planche d'irrigation. Dans un second temps, nous pouvons nous interroger sur la méthode d'obtention de l'optimum. Dans la section 4.3, nous avons proposé une recherche de position du capteur basée sur l'optimisation de l'efficacité d'application et du remplissage de la réserve utile. Les différents critères et perspectives abordés dans cette étude nous permettent d'imaginer d'autres méthodes d'optimisation de position du capteur, basées sur plusieurs indicateurs et adaptables dans le temps en fonction des contextes (par exemple un besoin de flux ruisselé en colature pour alimenter un écosystème aquatique à un moment de l'année, d'une réduction des prélèvements en cas de tension sur la Durance, ou d'une augmentation des flux de percolation en cas de tension sur l'aquifère). Dans cette optique, la combinaison du modèle intégré et du système d'automatisation par capteur au champ représente un outil

d'aide à la décision multi-critère et dynamique intéressant.

Les résultats obtenus pour l'estimation du temps de travail soulignent une fois de plus la charge de travail que représente l'irrigation gravitaire, qui devient un emploi à plein temps pour l'aiguadier dans les plus grands domaines (Ibgui, 2021). Les simplifications réalisées ont permis la comparaison des scénarios mais ne prennent par ailleurs pas en compte les autres tâches liées à la gestion de l'irrigation à la planche (curage des canaux et des fossés de colature, entretien des ouvrages et des vannes martelières, etc.). Il est difficile d'anticiper à ce stade le temps nécessaire à la maintenance du système d'automatisation, qui sera variable en fonction du niveau de prise en main des usagers et de la robustesse du prototype, mais qui devrait être pris en compte dans les prochaines études. Par ailleurs, la prise de recul vis à vis du prototype proposé section 3.4 devrait également permettre d'intégrer les coûts d'installation (estimés à environ $125 \text{ euros.ha}^{-1}$) et de maintenance du système d'automatisation dans l'analyse économique du scénario d'adoption.

Pour autant, la plus value de l'automatisation n'est pas tant la réduction du temps de travail que la diminution de sa pénibilité, en particulier lors des périodes les plus contraignantes (tours d'eau nocturnes, le week-end, pics de travail), pouvant générer excès d'eau ou abandon des surfaces cultivées. En ce sens, l'automatisation apparaît comme un levier pour assurer la durabilité du système, dont les vertus à l'échelle territoriale sont reconnues. La prise en compte des facteurs de pénibilité, physique (une martelière peut peser jusque 25 kg) ou liée au travail de nuit, devrait permettre d'enrichir les indicateurs du modèle. En outre, l'opportunité de la réduction des durées de tour d'eau par automatisation amène à se poser de nouvelles questions sur les potentielles ré-organisations de la distribution, à l'échelle de l'exploitation, du périmètre ou de l'infrastructure territoriale. L'approche proposée pourrait par ailleurs permettre d'intégrer d'autres types de services liés à l'irrigation, et les prochaines études gagneraient à prendre en compte les services écosystémiques des fossés et canaux agricoles (Rudi, 2019).

Au delà de ses limites et simplifications, l'objectif de ce travail était d'expérimenter une approche multi-critère et multi-échelle originale à travers un exemple

type. La méthode proposée permet de mettre en lumière les questions et les compromis qui peuvent apparaître lors de l'adoption de nouvelles pratiques de gestion de l'eau. Dans le contexte spécifique de la plaine de la Crau, les résultats suggèrent que l'adoption du système d'automatisation par capteur au champ serait bénéfique pour le producteur sur les plans hydraulique (réduction des volumes consommés), agronomique (amélioration de la productivité agricole de l'eau) et socio-économique (allègement du temps de travail, amélioration de la productivité économique de l'eau). La prise en compte de plusieurs perspectives permet d'élargir modestement l'échelle d'analyse en considérant les bénéfices potentiels des flux d'eau d'irrigation excédentaires. Cette approche permet de souligner les compromis liés à l'adoption de la technologie selon les contextes agro-hydrologiques. Par exemple, le bénéfice de l'automatisation est moins évident dans le cas d'une exploitation qui n'a pas de contrainte de main d'oeuvre, si tant est que cela soit possible, et qui ré-utilise les volumes ruisselés en colature.

Néanmoins, l'usage de l'indicateur de productivité de l'eau, même dans le cadre d'une étude multi-critère et multi-perspectives, peut présenter certains risques (Zoebl, 2006). Dans le contexte de notre étude, un exemple d'interprétation risquée serait de considérer que l'amélioration de la productivité de l'eau par le système d'automatisation devrait nécessairement entraîner une adoption massive de la technologie à l'échelle du territoire. Or il est nécessaire de s'interroger sur les implications d'une telle décision sur la disponibilité de l'eau à l'échelle du bassin versant, en particulier dans le contexte de la plaine de la Crau qui bénéficie d'un transfert inter-bassins des eaux de la Durance. Nos résultats suggèrent qu'une économie des volumes appliqués pour l'irrigation gravitaire du foin est réalisable sans impact sur le rendement et avec un impact modéré sur la recharge de l'aquifère. Pour autant l'économie d'eau réelle dépendra du devenir de ces volumes sauvés au champ, selon qu'ils complètent le débit écologique de la Durance (ce qui impliquerait une répercussion des économies en amont par la régulation des canaux primaires) , contribuent à l'extension des surfaces irriguées, alimentent les zones humides de la Crau ou se mêlent aux rejets industriels de l'étang de Berre.

Chapitre 5

Discussion et conclusion générales

Table des matières

5.1	Discussion générale	197
5.2	Perspectives	206
5.3	Conclusion générale	211

5.1 Discussion générale

Nos travaux de thèse ont cherché à développer une innovation technologique utile et accessible aux systèmes irrigués pour accompagner la gestion de l'eau en agriculture et contribuer à la durabilité des territoires. Nous avons abordé ce vaste objectif à travers trois questions de recherche qui ont guidé notre stratégie. Les résultats spécifiques des étapes de nos travaux ont été discutés tout au long de ce manuscrit, et nous proposons une discussion générale en réponse à nos questions de recherche initiales.

En premier lieu, **comment orienter la recherche de performance des systèmes irrigués pour éviter les déséquilibres à l'échelle territoriale ?**

L'enjeu principal de l'agriculture comparée est, selon M. Dufumier, de "concevoir les nouvelles conditions agro-écologiques et socio-économiques à créer pour que les différents types d'exploitants aient les moyens de mettre en oeuvre les systèmes de production les plus conformes à l'intérêt général et qu'ils en aient eux-mêmes l'intérêt. Cela suppose une connaissance relativement fine des éléments agro-écologiques et socio-économiques sur lesquels il convient d'intervenir prioritairement pour modifier le comportement des agriculteurs et le devenir de leurs systèmes de production" (cité par Cochet, 2011). L'analyse-diagnostic réalisée sur les territoires de la Crau et d'El Haouaria nous a permis d'appréhender le fonctionnement de deux contextes agraires méditerranéens à travers le prisme de l'eau. Nous avons identifié des systèmes de production "clés de voûte", à la fois maillons essentiels des équilibres hydrologiques et vulnérables sur le plan socio-économique. C'est avec ces systèmes prioritaires que nous avons, pour reprendre les termes de M. Dufumier, cherché à produire des moyens adaptés pour une gestion de l'eau conforme tant à l'intérêt général qu'à leurs propres intérêts.

Dans la plaine d'El Haouaria, cette démarche s'est traduite par la conception d'un capteur d'humidité du sol comme outil d'aide à la décision pour le pilotage de l'irrigation au goutte-à-goutte des systèmes maraîchers, en particulier des petites exploitations familiales. Il s'agissait de limiter les prélèvements en eau dans un aquifère sur-exploité, en réduisant les écarts de performance découlant des conditions pédo-climatiques (sols sableux à forte conductivité hydraulique, conditions fortement évaporantes) et des inégalités socio-économiques entre les systèmes de production (inégalités de parcours scolaire, d'accès à l'information et de moyens d'investissement pour de l'équipement d'irrigation). En parallèle, les intérêts propres des agriculteurs sont assurés par le gain de temps, la stabilisation des rendements, et les économies sur les coûts intermédiaires liés à l'irrigation (réduction des frais de pompage ou des montants de redevance).

Dans la plaine de la Crau, nous avons conçu des outils pour accompagner, par l'aide à la décision et l'automatisation des vannes, la gestion de l'eau des systèmes pratiquant l'irrigation gravitaire du foin. Il s'agissait à l'échelle du territoire de chercher à préserver une pratique indispensable à son équilibre hydrologique (par la recharge de l'aquifère), en apportant à l'échelle de l'exploitation un moyen simple et accessible pour réduire la pénibilité du travail et mieux maîtriser les écoulements gravitaires.

L'application des méthodes de l'agriculture comparée s'est ainsi avérée pertinente afin d'orienter la recherche de performance des systèmes irrigués : en permettant d'une part une compréhension fine des pratiques d'irrigation et leur comparaison selon les systèmes de culture et de production, et en procurant d'autre part une vision holistique du territoire, dont la représentation systémique facilite les changements d'échelle, indispensable à l'anticipation des potentiels effets induits par le développement de nouvelles pratiques. Nos résultats soulignent l'importance de ce travail d'investigation au préalable de toute recherche de performances, d'innovation ou de modernisation des systèmes irrigués, comme l'ont également souligné les récentes études de Oyonarte et al. (2022) ou Jana et Tamang (2023).

Ces premiers résultats nous ont mené à nous confronter à notre seconde question de recherche. **Dans quelle mesure, et sous quelles formes, les technologies numériques de l'information peuvent-elles être façonnées par les territoires pour contribuer à cette recherche de performances ?**

Le processus d'innovation au sein des territoires s'est incarné sous la forme des *Water user Fab Labs (WFL)*, qui ont apporté un cadre physique et social utile à la cristallisation de la recherche d'alternatives. A travers ces environnements, nous avons développé et expérimenté avec les agriculteurs des nouvelles technologies pour accompagner la gestion de l'eau agricole. Ces innovations ont répondu à des besoins et contraintes communes aux deux sites d'étude, et ont ainsi pris la forme de réseaux de capteurs connectés (*WSN*), accessibles économiquement et techniquement, permettant le suivi des flux d'eau en temps réel. L'adaptation aux besoins spécifiques des systèmes irrigués s'est traduite sur le plan technologique par une diversité de nouveaux systèmes de mesure et d'information.

Ainsi dans la plaine de la Crau nous avons vu comment le développement d'un système de mesure simple, communiquant à distance une information binaire, pouvait permettre de faciliter la gestion de l'irrigation gravitaire. Le système *WatAr* permet la détection des écoulements de surface au champ et la transmission de l'information sous la forme d'une alerte par messagerie sur le téléphone de l'irrigant. Son expérimentation en conditions réelles, au cours d'une saison d'irrigation du foin par ruissellement (irrigation à la planche), a conduit à son amélioration continue et a confirmé la robustesse et la fiabilité du système.

Dans la plaine d'El Haouaria, nous avons exploré la faisabilité d'un système relativement plus complexe, basé sur la mesure, la conversion numérique et la transmission d'une variable continue pour l'aide à la décision dans le pilotage de l'irrigation goutte-à-goutte. Le système *Pilowtech* permet de mesurer l'humidité du sol à plusieurs profondeurs. Nous avons proposé une méthode de calibration, basée sur un seul paramètre dépendant du type de sol, et réalisable au laboratoire ou sur le terrain. Les agriculteurs peuvent accéder à la donnée selon leurs préférences, à distance, *via* une interface en ligne, ou au champ via un boîtier de

lecture directe. La donnée peut être fournie, selon les préférences et le degré de connaissance des caractéristiques du sol, sous la forme d'humidité volumique ou d'un indicateur de niveau de remplissage de la réserve utile du sol. L'expérimentation du Pilowtech en conditions réelles, au cours d'une saison d'irrigation au goutte-à-goutte de la pomme de terre, a conduit à son amélioration continue. La comparaison des données produites avec des sondes d'humidité du commerce a souligné les bonnes performances du capteur.

Le processus d'innovation dans la plaine de la Crau a également conduit à la réalisation d'un système plus complexe, basé sur l'échange de données entre capteurs au champ, ou de l'utilisateur vers le capteur, pour l'automatisation des vannes d'irrigation gravitaire. Le système *Lancelot* permet d'actionner les vannes à distance, à partir du contrôle de l'agriculteur sur une application de messagerie, ou de manière automatique à partir de la détection de la lame d'eau par le capteur *WatAr* situé à l'aval de la planche d'irrigation. L'évaluation de ce dispositif, mis en place sur un secteur d'irrigation gravitaire d'une dizaine d'hectares, nécessite une période suffisamment longue pour caractériser sa fiabilité et est encore en cours. Nous supposons néanmoins que ce système sera plus robuste et fiable qu'une automatisation des vannes basée sur la mesure d'une variable continue comme l'humidité du sol (Pramanik et al., 2022).

Ces développements illustrent les possibilités d'un numérique *low-tech* pour l'agriculture, fait de technologies alternatives i) plus accessibles, car simples et à bas coût ; ii) reproductibles, car simples et open source ; iii) durables, car réparables, économes en énergie, et impliquant de petits volumes de données ; iv) et plus adaptables à la diversité des pratiques et systèmes de culture car open source et modulables. En somme, la low-tech numérique représente une opportunité d'ouvrir la "boîte noire" des technologies de l'information - au sens propre comme au figuré - pour en faire des outils adaptés aux systèmes de production, et non l'inverse. De fait, elle rend possible la co-conception et l'auto-construction des technologies pour l'agriculture de précision, et ouvre la voie à des systèmes de production plus autonomes et plus économes.



FIGURE 5.1 – *Low-tech* numériques pour l’agriculture : ouvrir la "boite noire" des technologies de précision pour en faire une "boite blanche".

Notre expérience a mis en évidence l’importance des *Water user Fab Labs* (*WFL*) pour accompagner cette démocratisation de l’innovation numérique dans les marges des systèmes plus standardisés. Nous avons vu d’une part que ces environnements se sont révélés indispensables au développement d’outils utiles et utilisés par les agriculteurs, en offrant un cadre favorable à la conception participative tout au long du processus de l’innovation. D’autre part, les *WFL* sont venus compenser en partie les limites inhérentes à la *low-tech* numérique. De fait, malgré la simplification des technologies, la fabrication et la maintenance des outils développés restent exigeantes en temps et compétences, et le risque d’une innovation à deux vitesses, du fait du décalage entre la vitesse d’évolution des technologies *IoT* et la vitesse d’adoption et de diffusion des innovations, n’est pas à écarter. Ces réflexions semblent indiquer un glissement des barrières à l’adoption des technologies pour l’agriculture de précision à l’échelle de l’individu : d’ordre principalement économique et technique pour l’agriculture de précision *high-tech* (Barnes et al., 2019 ; Lamb et al., 2008), elles relèvent davantage de facteurs sociaux (disponibilité) et comportementaux (curiosité) dans le cadre d’une approche *low-tech*. Dans cette mesure, nous estimons que les *WFL* représentent des structures intéressantes pour le contournement de certaines de ces barrières, en permettant la mise en commun de certains équipements (antenne LoRa, serveur local si besoin) et matériel nécessaire à la fabrication et la maintenance (petit outillage, commandes groupées de composants électroniques), et surtout la mise en commun des compétences entre les usagers. En outre, ils

peuvent également participer à la diffusion de l'innovation au sein et au delà du territoire, en assumant un rôle de vitrine de l'innovation, en particulier s'ils sont adossés à des groupements d'agriculteurs (associations d'usagers de l'eau, CUMA, AOP, etc.).

Dans le cadre des WFL ou à leurs bordures, nous avons animé des ateliers de construction des capteurs *low-tech* développés auprès d'une centaine d'acteurs variés du secteur agricole, en France et en Tunisie. Cette expérience nous a permis de tester l'accessibilité des innovations (*Pilowtech* et *WatAr*), qui se sont avérées reproductibles par l'ensemble des participants de tout âge, niveau d'éducation ou catégorie socio-professionnelle. Le degré d'autonomie des usagers vis-à-vis de la technologie et des supports de diffusion proposés demeure toutefois à préciser, par exemple par l'organisation d'ateliers de construction dépourvus d'animation. Il serait par ailleurs intéressant d'étudier, dans le cadre d'ateliers multi-acteurs, la pertinence de ce type d'atelier pour engager des réflexions collectives sur la gestion de l'eau territoriale, à l'instar des jeux sérieux (Venot, C. B. Jensen et al., 2022). La méthode des ateliers de construction de *low-tech* numériques pour la gestion de l'eau est apparue comme un moyen efficace pour favoriser la diffusion des innovations, et donner les moyens aux participants de les transformer selon leurs besoins.

Ainsi une approche participative de co-conception a permis de façonner l'innovation technologiques selon les besoins et contraintes des usagers. Ce processus s'est traduit par le développement d'outils numériques *low-tech* aux formes plurielles, qui ont été expérimentées avec les agriculteurs. Notre expérience nous a permis de discuter des perspectives de l'adoption et de la diffusion des outils développés. Ces réflexions nous ont naturellement amené à nous interroger sur les impacts de l'adoption de ces nouveaux équipements, dans le temps et dans l'espace. **Comment évaluer les effets de l'adoption de ces nouvelles technologies sur les performances des systèmes irrigués, en tenant compte de leurs implications à plus large échelle ?**

Nous avons proposé une méthode d'évaluation des effets de l'adoption des nouvelles technologies sur les performances des systèmes irrigués par une approche multi-échelle et multi-critère, à travers l'exemple des innovations développées sur le site français. L'approche retenue est basée sur l'utilisation d'une plateforme ouverte pour la représentation des processus agro-hydrologiques (Openfluid, Fabre et al. (2010)), permettant d'intégrer diverses dynamiques temporelles et unités spatiales, et d'inclure des modules spécifiques en mesure de simuler le recours à des systèmes d'aide à la gestion (comme les systèmes *WatAr* ou *Pillowtech*). Le modèle numérique *Surffrri* nous a permis de simuler dans le temps et l'espace les variations hydrodynamiques de l'irrigation à la planche d'un petit périmètre irrigué pour la culture du foin, avec ou sans système d'alerte. A partir du couplage d'un simulateur des écoulements d'eau de surface (adapté de Bader et al., 2010) avec des simulateurs de croissance de la culture et des variations d'humidité du sol (adaptés de Mailhol et Merot, 2008), nous avons pu modéliser les variations temporelles des facteurs affectant les écoulements de surface (rugosité du couvert, humidité initiale) pour chaque parcelle du périmètre au cours d'une saison d'irrigation complète. La simulation de ces variables, associée aux données de suivi terrain des variables hydrauliques (débits injectés, avancée de la lame d'eau), de gestion (calendrier et durées d'irrigation), agronomiques (rendements) et socio-économiques (temps de travail, produit brut), ont rendu possible : i) l'optimisation du positionnement du capteur *WatAr* le long de la parcelle au cours de la saison ; ii) l'évaluation des gains de performance induits par l'adoption des innovations développées (*WatAr* et *Lancelot*) à l'échelle de la parcelle ; iii) l'évaluation des gains de performance induits par l'adoption des innovations à l'échelle du périmètre irrigué.

Nos résultats ont montré que, en moyenne pour une saison d'irrigation et par rapport aux pratiques actuelles, le pilotage de l'irrigation de surface assisté par un capteur de détection d'eau et un système d'automatisation pouvait :

A l'échelle de la parcelle, améliorer significativement l'efficacité d'application tout en maintenant le remplissage de la réserve utile du sol. Cette amélioration représenterait une économie potentielle des volumes apportés de l'ordre

de 30%. La gestion par capteur au champ s'est par ailleurs montrée plus efficace qu'une durée d'irrigation optimisée par simulation - *cutoff time*, qui est la règle classique sur laquelle sont concentrées la plupart des recherches d'optimisation de l'irrigation gravitaire (Alavi et al., 2022) - pour réduire les écarts à la performance pouvant survenir en cas de variabilité ou d'incertitude sur les conditions initiales de l'irrigation.

A l'échelle du périmètre irrigué, réduire les volumes d'irrigation appliqués de l'ordre de 12%, les volumes percolés en profondeur de l'ordre de 6%, et les volumes ruisselés en colature de plus de 90%, pour des volumes stockés dans la zone racinaire équivalents. En outre, l'automatisation permettrait une compensation plus uniforme et plus régulière du déficit hydrique du sol, une amélioration de la productivité de l'eau d'irrigation (*WP*) de l'ordre de 15%, et une réduction significative du temps de travail et de sa pénibilité.

Selon les perspectives, permettre des gains de productivité de l'eau variables : faibles en considérant les flux de colature comme ré-utilisables (+5%), et conséquents en considérant les flux de percolation profonde comme ré-utilisables (+37%).

Dans le contexte spécifique de la Crau, l'adoption du système d'automatisation par capteur au champ apparaît ainsi bénéfique pour le producteur sur les plans hydraulique (réduction des volumes consommés), agronomique (amélioration de la productivité agricole de l'eau et de la réponse au déficit hydrique du sol) et socio-économique (allègement de la charge de travail et amélioration de la productivité économique de l'eau). A plus large échelle, les résultats suggèrent qu'une économie des volumes appliqués pour l'irrigation gravitaire du foin est réalisable sans impact sur le rendement et avec un impact relativement modéré sur la recharge de l'aquifère. Pour autant, le bénéfice de l'automatisation apparaît moins évident dans le cas d'une exploitation ou d'un périmètre qui ré-utilise les volumes ruisselés en colature. En outre, les économies d'eau réelles dépendront inévitablement du devenir de ces volumes sauvés au champ.

Ainsi l'approche proposée a permis de mettre en perspective l'évaluation des performances des systèmes irrigués, selon différentes dimensions et différentes

échelles d'analyse, et d'éclairer la diversité de compromis pouvant émerger avec l'adoption de nouvelles technologies et les changements de pratiques de l'irrigation. Nous estimons que le modèle SurfIrri, en permettant une représentation fine des transferts d'eau au sein de la parcelle et leur mise à l'échelle dans le temps et dans l'espace, représente un outil précieux pour favoriser une gestion intégrée de la ressource en eau dans les territoires pratiquant l'irrigation de surface. De fait, son utilisation combinée avec des capteurs au champ pourrait constituer une avancée pour une aide à la décision dynamique, qui rend compte des marges de manoeuvre dans la répartition des volumes d'irrigation et leurs implications sur les différentes dimensions du système irrigué, et qui soit adaptable dans le temps en fonction des objectifs visés (par exemple, un besoin de flux ruisselé en colature pour alimenter un écosystème aquatique à une période de l'année, d'une réduction des prélèvements en cas de tension sur le réservoir ou les milieux naturels, ou d'une augmentation des flux de percolation en cas de tension sur l'aquifère).

5.2 Perspectives

Diversifier les outils d'aide à la décision reposant sur la mesure directe en les adaptant aux systèmes irrigués

Le développement rapide des technologies de l'IoT se traduit par une offre de plus en plus diversifiée en terme de capteurs mobilisables pour la gestion de l'eau agricole. Plusieurs études ont récemment montré la faisabilité technique de systèmes IoT pour la mesure directe de variables (ex. humidité du sol, hauteur d'eau, pression hydrostatique, conductivité hydraulique du sol) pouvant être utiles à la gestion quantitative de l'eau (Chamara et al., 2022; Abdelmoneim et al., 2021; Hamami et Nassereddine, 2020), ou pour le suivi de variables (ex. conductivité électrique de l'eau, concentration en nitrates, pH de l'eau) pouvant servir d'indicateurs de la qualité de la ressource en eau (Garrido-Momparler et Peris, 2022; Ludeña-Choez et al., 2022; Paul et al., 2022). Néanmoins, peu d'études sont allées au delà des preuves de concept en laboratoire ou des expérimentations en conditions contrôlées, et ont adapté ces nouveaux systèmes de mesure pour en faire des outils d'aide à la décision à destination des usagers de l'eau. Nos travaux ont souligné l'importance d'inscrire la recherche de nouveaux outils d'aide à la décision pour la gestion de l'eau agricole dans une démarche de développement qui tienne compte de la diversité des besoins et pratiques d'irrigation, et de leurs effets à l'échelle territoriale, dans l'optique de concilier une gestion de l'eau conforme aux intérêts des systèmes de production et à l'intérêt général, toutes perspectives confondues. Aussi, les prochaines études pourront s'appuyer sur ces travaux afin de façonner l'innovation technologique pour l'adapter aux territoires et explorer les multiples formes que peuvent prendre les outils d'aide à la décision pour accompagner la grande diversité des systèmes irrigués et les enjeux qui leurs sont propres.

En outre, les technologies développées dans le cadre de cette thèse ont été conçues comme des outils évolutifs, qui sont appelés à changer au gré des reconceptions et autres bricolages, signe de leur ré-appropriation par les usagers de l'eau (Benouniche, Zwarteveen et al., 2014). Il serait intéressant d'étudier

à plus long terme dans quelle mesure la *low-tech* numérique facilite réellement cette dynamique de ré-appropriation par les usagers, et comment les améliorations continues et re-conceptions des outils au cours de leur diffusion pourraient contribuer à renforcer leur adéquation face à l'hétérogénéité des systèmes de culture et des contextes agraires (Ould Rebai et al., 2017).

Des mesures simples pour appréhender des dynamiques socio-hydrologiques complexes ?

Nous estimons que la force des innovations proposées réside dans leur capacité à faciliter la compréhension des flux d'eau à partir de mesures simples au sein de systèmes souvent contraints par un manque d'information. Il est évident que les systèmes de mesure *low-tech* ne peuvent remplacer les équipements *high-tech* dans les protocoles de recherche, ces derniers étant souvent indispensables pour garantir la fiabilité et la précision des données collectées. En revanche, nous estimons que les capteurs connectés *low-tech* pourraient être utilisés pour la mesure en temps réel de variables hydrologiques simples (ex. données binaires présence/absence d'eau de surface), et suppléer à un manque de données dans certains contextes. L'usage de telles technologies pourrait par exemple être intégré à des méthodes de suivi de l'évolution des dynamiques d'inondation dans les plaines deltaïques combinant la mesure *in situ* et par télédétection (Orieschnig et al., 2022). De fait, les avancées dans le secteur de l'imagerie spatiale permettent dorénavant d'obtenir des informations pertinentes et accessibles pour la gestion de l'eau, à des résolutions spatiales et temporelles élevées (ex. images optiques et radar de *Sentinel*), et nous pouvons faire l'hypothèse que la mesure directe au champ pourra être complémentaire en produisant des données à plus haute résolution temporelle (quelques minutes contre quelques jours pour *Sentinel*) qui seront vérifiables par télédétection.

Les projets de science citoyenne reposent sur la participation de la population à grande échelle pour faire remonter les informations du terrain (Bonney et al., 2009). Ces dernières années, les initiatives de science citoyenne ont apporté une contribution significative à la collecte de données environnementales

et en particulier pour la recherche hydrologique (Njue et al., 2019; Buytaert et al., 2014; Le Coz et al., 2016). Pandeya et al. (2021) ont récemment souligné le potentiel des sciences citoyennes pour générer localement des données et des connaissances pertinentes pour une gestion des services écosystémiques liés à l'eau plus décentralisée. Ils ont par ailleurs identifié le développement de capteurs à bas coût adaptés aux contextes locaux comme un défi clé pour la réussite de ces suivis collaboratifs à grande échelle. Ainsi, nous suggérons que les méthodes d'innovation participative et les systèmes de mesure développés dans ces travaux de thèse peuvent contribuer à la conception d'instruments de mesure simples, communicants en temps réel et adaptables aux contextes socio-économiques et environnementaux pour appuyer les initiatives citoyennes pour la recherche hydrologique.

La *low-tech* numérique peut-elle contribuer à la transition agroécologique ?

L'agroécologie représente une alternative durable aux systèmes conventionnels, en proposant des pratiques reposant sur l'intégration des processus écologiques et la limitation de l'usage des intrants extérieurs au système (Altieri, 1999; Duru et al., 2015). Néanmoins, la complexification des systèmes qu'elle implique conduit à un manque de connaissances scientifiques vis-à-vis des changements dans les processus biophysiques établis, notamment les impacts sur les bilans hydriques (Celette et al., 2008; Novara, Pisciotta et al., 2018). Ce manque de connaissance peut représenter un frein à l'adoption de pratiques agroécologiques (Fernández-Mena et al., 2021). Les capteurs connectés pour l'agriculture représentent une opportunité pour combler ce manque de connaissances, à travers la production à grande échelle de données, essentielles pour la création de modèles représentant les mécanismes complexes de l'agroécologie, difficiles à modéliser par une approche déterministe (Bellon Maurel et al., 2022). Gascuel-Oudou et al. (2022) identifient en outre les technologies numériques comme un levier majeur pour fournir des outils de suivi et d'aide à la décision favorisant l'adoption de pratiques agroécologiques, et notamment l'usage de capteurs pour "adapter la

gestion des cultures à l'hétérogénéité des environnements". Aussi, les résultats de ce travail de thèse pourraient contribuer d'une part à améliorer la compréhension des flux d'eau au sein des systèmes de culture agroécologiques et plurispécifiques (ex. suivi à haute résolution spatiale de l'état hydrique du sol pour caractériser les compromis entre services écosystémiques, et les effets de pratiques agroécologiques de conservation de l'eau du sol (Canet-Martí et al., 2023), et d'autre part à accompagner la prise de décision relative à la gestion de la ressource en eau au sein des systèmes de production agroécologiques (ex. décision de destruction du couvert végétal à partir d'un indicateur de l'état hydrique du sol). De prochaines études pourraient s'appuyer sur la plasticité des *low-tech* numériques développées et sur les méthodes de co-conception proposées afin d'adapter les outils aux besoins spécifiques des systèmes agroécologiques.

A travers ces exemples, nous percevons la grande diversité des opportunités accompagnant le développement de systèmes de mesure connectés, auto-constructibles et à bas coût. Il nous paraît important toutefois de garder à l'esprit que tout ce qui peut être compté ne compte pas nécessairement, et qu'une multiplication des systèmes d'information devra s'accompagner d'une vigilance particulière sur les volumes de données générés (préférer les réseaux bas débit, ajuster les fréquences et les volumes pour l'émission, optimiser le stockage dans les bases de données) ainsi qu'aux composants électroniques utilisés (empreinte environnementale de leur fabrication, transport et recyclage, limiter le renouvellement du matériel et préférer sa ré-utilisation).

Représenter les compromis pour une gestion intégrée des systèmes irrigués

Nous avons proposé une approche multi-critère et multi-échelle afin d'évaluer les compromis émergeant de l'adoption des nouvelles technologies pour la gestion de l'eau. Cette méthode devrait servir de base pour de prochaines études, qui pourraient intégrer une plus grande diversité de critères (ex. services écosystémiques des fossés et canaux agricoles (Rudi, 2019), coût énergétique de l'irrigation (Belaud et al., 2020)) et représenter les dynamiques des systèmes irrigués

à plus large échelle (ex. territoriale, en intégrant plusieurs périmètres irrigués et les réseaux de distribution primaire et secondaire). Toutefois, la complexification à outrance des modèles agro-hydrologiques peut parfois conduire à des difficultés de calibration, et limiter leur applicabilité à une diversité de contextes (L. Pereira et al., 2020) ou leur mise à l'échelle (Siad et al., 2019).

Il serait par ailleurs intéressant d'évaluer l'effet de l'adoption des nouvelles technologies sur la prise de décision stratégique à plus long terme. Par exemple, sous l'effet de la mécanisation et de l'augmentation de la taille des exploitations, ces dernières ont eu tendance à augmenter la dimension des parcelles afin de faire des économies d'échelle (Lu et al., 2018). C'est le cas notamment des parcelles irriguées par gravité, l'augmentation de la longueur des planches d'irrigation permettant de limiter la main d'oeuvre et la pénibilité du travail (tours d'eau longs), avec comme corollaire une moins bonne maîtrise de l'application des flux d'eau (Nie, Dong et al., 2021). L'adoption des technologies développées pour l'automatisation de l'irrigation gravitaire pourrait-elle favoriser le retour vers de plus petites parcelles, et ainsi une maîtrise plus fine des volumes d'irrigation appliqués ?

L'adoption des outils d'aide à la décision et systèmes d'automatisation pour l'irrigation peut en outre avoir une incidence sur la fréquence et la durée des tours d'eau. Dans cette mesure, les prochaines études gagneraient à coupler le modèle biophysique développé avec des modèles décisionnels, afin de prendre en compte les règles et contraintes de gestion pouvant émerger à l'échelle de l'exploitation agricole (Merot et Bergez, 2010) ou dans le cadre d'une gestion collective de la ressource à l'échelle du périmètre irrigué (Richard et al., 2022).

5.3 Conclusion générale

Nous avons vu à travers cette thèse que la recherche de performances des systèmes irrigués pouvait être orientée, grâce à une compréhension fine des agro-hydrosystèmes, à destination de systèmes de production prioritaires, qui représentent des maillons essentiels à l'équilibre socio-économique et hydrologique du territoire irrigué. La mise en place de Water user Fab Labs, environnements pour penser et expérimenter l'innovation collectivement, peut favoriser l'émergence et l'adoption de nouveaux outils pour accompagner la gestion de l'eau de ces systèmes. Dans ce cadre, nous avons montré que la *low-tech* numérique offrait la possibilité de concevoir de nouveaux systèmes de mesure, d'aide à la décision et d'automatisation pour le suivi et le pilotage de l'irrigation, davantage accessibles et adaptés aux besoins des agriculteurs. Simples, open source et à bas coût, ces innovations modulables et auto-constructibles représentent une opportunité pour mieux comprendre les flux d'eau et ouvrent la voie vers des systèmes de production plus économes et autonomes. Nous avons proposé une méthode qui permet d'évaluer les effets de l'adoption de ces nouvelles technologies sur les performances des systèmes irrigués en tenant compte de plusieurs dimensions et échelles d'analyse. Nos résultats mettent en perspective les bénéfices des changements de pratiques liés à l'adoption des nouveaux outils, et illustrent les compromis émergeant à plus large échelle.

Ces travaux de thèse contribuent à la recherche d'outils numériques utiles et accessibles aux systèmes irrigués pour accompagner la gestion de l'eau en agriculture et participer à la durabilité des territoires. Les méthodes et résultats exposés ouvrent de nouvelles perspectives pour une diversification des outils d'aide à la décision pour la pratique de l'irrigation, qui correspond davantage à la diversité des systèmes de culture et de production. Ces travaux peuvent également inspirer les études visant à appréhender des dynamiques socio-hydrologiques à grande échelle à partir de systèmes de mesure directe décentralisés, simples et adaptables aux conditions locales. Il serait particulièrement intéressant d'explorer dans quelle mesure la co-conception de *low-tech* numérique pour la gestion de

l'eau peut représenter une opportunité pour mieux comprendre et mieux gérer les flux d'eau au sein des systèmes agroécologiques. Ces travaux peuvent en outre servir de base à de futures études cherchant à représenter les divers compromis découlant de l'adoption de nouvelles technologies et changements de pratiques d'irrigation associés pour favoriser une gestion intégrée des systèmes irrigués. Pour autant, la démocratisation et la dissémination à grande échelle de ces technologies ne risquent-elles pas d'accentuer l'exploitation d'autres ressources naturelles, notamment non renouvelables ? Si nous pensons que la *low-tech* numérique peut contribuer à la durabilité des systèmes irrigués et accompagner la transition agroécologique, cette question demeure toutefois essentielle afin d'anticiper les potentiels effets rebonds et organiser en amont des dispositifs de régulation adaptés.

Bibliographie

- Abdelmoneim, A. A., A. Daccache, R. Khadra, M. Bhanot et G. Dragonetti (2021). « Internet of Things (IoT) for double ring infiltrometer automation ». en. In : *Computers and Electronics in Agriculture* 188, p. 106324. DOI : 10.1016/j.compag.2021.106324.
- Abebe, F., A. Zuo, S. A. Wheeler, H. Bjornlund, A. van Rooyen, J. Pittock, M. Mdemu et M. Chilundo (2020). « Irrigators' willingness to pay for the adoption of soil moisture monitoring tools in South-Eastern Africa ». In : *International Journal of Water Resources Development* 36.sup1, S246-S267. DOI : 10.1080/07900627.2020.1755956.
- Abioye, E. A., M. S. Z. Abidin, M. S. A. Mahmud, S. Buyamin, M. H. I. Ishak, M. K. I. A. Rahman, A. O. Otuoze, P. Onotu et M. S. A. Ramli (2020). « A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 173, p. 105441. DOI : 10.1016/j.compag.2020.105441.
- Adla, S., N. K. Rai, S. H. Karumanchi, S. Tripathi, M. Disse et S. Pande (2020). « Laboratory Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Capacitive and Very Low-Cost Resistive Soil Moisture Sensors ». In : *Sensors* 20.2. Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 363. DOI : 10.3390/s20020363.
- Akakpo, K. (2021). « What agroecological perspectives in irrigated agriculture in the Mediterranean context to reconcile agricultural production and environmental sustainability? Application to drip irrigated market gardening in Centra Tunisia. » Thèse de doct. Montpellier : Montpellier SupAgro.

- Alavi, S. A., A. A. Naseri, H. Ritzema, J. van Dam et P. Hellegers (2022). « A combined model approach to optimize surface irrigation practice : SWAP and WinSRFR ». en. In : *Agricultural Water Management* 271, p. 107741. DOI : 10.1016/j.agwat.2022.107741.
- Alcott, B. (2005). « Jevons' paradox ». In : *Ecological Economics* 54.1, p. 9-21. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2005.03.020.
- Ali, E., W. Cramer, J. Carnicer, E. Georgopoulou, N. Hilmi, G. L. Cozannet et P. Lionello (2022). « Cross-Chapter Paper 4 : Mediterranean Region ». In : *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK et New York, NY, USA : IPCC, p. 2233-2272.
- Altieri, M. A. (1999). « The ecological role of biodiversity in agroecosystems ». In : *Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes*. Sous la dir. de M. G. Paoletti. Amsterdam : Elsevier, p. 19-31. DOI : 10.1016/B978-0-444-50019-9.50005-4.
- Andrieux, P. (1981). *Etudes des sols du Domaine du Merle. Méthodes et premiers Résultats*. Mémoire de D.D.A. ENSAM. P. 45.
- Anwar, A. A., W. Ahmad, M. T. Bhatti et Z. Ul Haq (2016). « The potential of precision surface irrigation in the Indus Basin Irrigation System ». In : *Irrigation Science* 34.5, p. 379-396. DOI : 10.1007/s00271-016-0509-5.
- Bader, J.-C., J.-L. Saos et F. Charron (2010). « Modèle de ruissellement, avancement et infiltration pour l'irrigation à la planche sur un sol recouvrant un sous-sol très perméable ». In : *Hydrological Sciences Journal* 55.2, p. 177-191. DOI : 10.1080/02626660903546050.
- Barnes, A. P., I. Soto, V. Eory, B. Beck, A. Balafoutis, B. Sánchez, J. Vangeyte, S. Fountas, T. van der Wal et M. Gómez-Barbero (2019). « Exploring the adoption of precision agricultural technologies : A cross regional study of EU farmers ». In : *Land Use Policy* 80, p. 163-174. DOI : 10.1016/j.landusepol.2018.10.004.

- Baruth, B., S. Bassu, W. Ben Aoun, I. Biavetti, M. Bratu, I. Cerrani et al. (2022). « JRC MARS Bulletin - Crop monitoring in Europe ». In : Vol.30,No.8. DOI : 10.2760/31930.
- Bautista, E., A. J. Clemmens, T. S. Strelkoff et J. Schlegel (2009). « Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR ». In : *Agricultural Water Management* 96.7, p. 1146-1154. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.007>.
- Belaud, G., L. Mateos, R. Aliod, M.-C. Buisson, E. Faci, S. Gendre, G. Ghinassi, R. Gonzales Perea, C. Lejars, F. Maruejols et N. Zapata (2020). « Irrigation and energy : issues and challenges ». In : *Irrigation and Drainage* 69.S1, p. 177-185. DOI : 10.1002/ird.2343.
- Bellon Maurel, V., P. Bonnet, I. Piot-Lepetit, L. Brossard, P. Labarthe, P. Maurel et J.-Y. Courtonne (2022). « Agriculture and Digital Technology : Getting the most out of digital technology to contribute to the transition to sustainable agriculture and food systems ». In : INRIA. Chap. Digital technology and agroecology : opportunities to explore, challenges to overcome.
- Bellon-Maurel, V. et C. Huyghe (2016). « L'innovation technologique dans l'agriculture ». In : *Géoéconomie* 80.3, p. 159. DOI : 10.3917/geoec.080.0159.
- Beltagui, A., A. Sesis et N. Stylos (2021). « A bricolage perspective on democratising innovation : The case of 3D printing in makerspaces ». In : *Technological Forecasting and Social Change* 163, p. 120453. DOI : 10.1016/j.techfore.2020.120453.
- Ben Hamouda, M. F. (2008). « Approche hydrogéochimique et isotopique des systèmes aquifères cotiers du cap bon : cas des nappes de la cote orientale et d'El Haouaria, Tunisie ». Thèse de doct. Tunis : Institut National Agronomique de Tunisie.
- Benouniche, M., M. Kuper, A. Hammani et H. Boesveld (2014). « Making the user visible : analysing irrigation practices and farmers' logic to explain actual drip irrigation performance ». In : *Irrigation Science* 32.6, p. 405-420. DOI : 10.1007/s00271-014-0438-0.

- Benouniche, M., M. Zwarteveen et M. Kuper (2014). « Bricolage as innovation : opening the black box of drip irrigation systems ». In : *Irrigation and Drainage* 63.5, p. 651-658. DOI : 10.1002/ird.1854.
- Berbel, J., C. Gutiérrez-Martín, J. A. Rodríguez-Díaz, E. Camacho et P. Montesinos (2015). « Literature Review on Rebound Effect of Water Saving Measures and Analysis of a Spanish Case Study ». In : *Water Resources Management* 29.3, p. 663-678. DOI : 10.1007/s11269-014-0839-0.
- Berbel, J. et L. Mateos (2014). « Does investment in irrigation technology necessarily generate rebound effects? A simulation analysis based on an agro-economic model ». In : *Agricultural Systems* 128, p. 25-34. DOI : 10.1016/j.agsy.2014.04.002.
- Bergez, J.-E., M. Sine et M. Mambrini (2022). « Les voies de l'innovation en agriculture numérique : les living labs et Digifermes®, des dispositifs pour la co-innovation ». In : *Annales des Mines - Enjeux Numériques, Conseil général de l'Économie, ministère de l'Économie et des Finances*, p. 103-121.
- Berthold, T. A., A. Ajaz, T. Olsovsky et D. Kathuria (2021). « Identifying barriers to adoption of irrigation scheduling tools in Rio Grande Basin ». In : *Smart Agricultural Technology* 1, p. 100016. DOI : 10.1016/j.atech.2021.100016.
- Blomquist, W. et E. Schlager (2005). « Political Pitfalls of Integrated Watershed Management ». In : *Society & Natural Resources* 18.2, p. 101-117. DOI : 10.1080/08941920590894435.
- Bonney, R., C. B. Cooper, J. Dickinson, S. Kelling, T. Phillips, K. V. Rosenberg et J. Shirk (2009). « Citizen Science : A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy ». en. In : *BioScience* 59.11, p. 977-984. DOI : 10.1525/bio.2009.59.11.9.
- Bos, M. G. et J. Nugteren (1990). *On irrigation efficiencies*. 4. ed. ILRI publication 19. Wageningen : ILRI.
- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche et al. (2003). « An overview of the crop model stics ». In : *European Journal of Agronomy* 18.3-4, p. 309-332. DOI : 10.1016/S1161-0301(02)00110-7.

- Brisson, N. (2009). « Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model ». In : Publisher : Éditions Quae, p. 1-298.
- Burt, C. M., A. J. Clemmens, T. Strelkoff, K. Solomon, R. Bliesner, L. Hardy, T. A. Howell et D. Eisenhaeur (1997). « Irrigation Performance Measures : Efficiency and Uniformity ». In : *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123, p. 20.
- Buytaert, W., Z. Zulkafli, S. Grainger, L. Acosta, T. C. Alemie, J. Bastiaensen et al. (2014). « Citizen science in hydrology and water resources : opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development ». In : *Frontiers in Earth Science* 2.
- Bwambale, E., F. K. Abagale et G. K. Anornu (2022). « Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture : A review ». In : *Agricultural Water Management* 260, p. 107324. DOI : 10.1016/j.agwat.2021.107324.
- Cai, W., X. Gu, Y. Du, T. Chang, S. Lu, X. Zheng, D. Bai, H. Song, S. Sun et H. Cai (2022). « Effects of mulching on water saving, yield increase and emission reduction for maize in China ». In : *Agricultural Water Management* 274, p. 107954. DOI : 10.1016/j.agwat.2022.107954.
- Canet-Martí, A., A. Morales-Santos, R. Nolz, G. Langergraber et C. Stumpp (2023). « Quantification of water fluxes and soil water balance in agricultural fields under different tillage and irrigation systems using water stable isotopes ». In : *Soil and Tillage Research* 231, p. 105732. DOI : 10.1016/j.still.2023.105732.
- Car, N. J., E. W. Christen, J. W. Hornbuckle et G. A. Moore (2012). « Using a mobile phone Short Messaging Service (SMS) for irrigation scheduling in Australia – Farmers’ participation and utility evaluation ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 84, p. 132-143. DOI : 10.1016/j.compag.2012.03.003.
- Carvalho Silva, J. de, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic et A. L. L. Aquino (2017). « LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of

- Things : A review and opportunities ». In : *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, p. 1-6.
- Celette, F., R. Gaudin et C. Gary (2008). « Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping ». In : *European Journal of Agronomy* 29.4, p. 153-162. DOI : 10.1016/j.eja.2008.04.007.
- Cerf, M., M.-H. Jeuffroy, L. Prost et J.-M. Meynard (2012). « Participatory design of agricultural decision support tools : taking account of the use situations ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 32.4, p. 899-910. DOI : 10.1007/s13593-012-0091-z.
- Chamara, N., M. D. Islam, G. (Bai, Y. Shi et Y. Ge (2022). « Ag-IoT for crop and environment monitoring : Past, present, and future ». en. In : *Agricultural Systems* 203, p. 103497. DOI : 10.1016/j.agry.2022.103497.
- Chevalier, J. M. et D. J. Buckles (2013). *Participatory Action Research*. Routledge. DOI : 10.4324/9780203107386.
- Cheviron, B., C. Serra-Wittling, J. D. Dominguez Bohorquez, B. Molle, M. Lo, Y. Elamri et M. Delmas (2020). « Efficience et optimisation de l'irrigation : le modèle Optirrig ». In : *Sciences Eaux Territoires* 34, p. 66-71. DOI : 10.14758/SET-REVUE.2020.5.12.
- Cochet, H. (2011). *L'agriculture comparée*.
- Contributors, O. F. (2022). *Node-RED*. URL : <https://nodered.org>.
- Courault, D., L. Hossard, V. Demarez, H. Dechatre, K. Irfan, N. Baghdadi, F. Flamain et F. Ruget (2021). « STICS crop model and Sentinel-2 images for monitoring rice growth and yield in the Camargue region ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 41, p. 49. DOI : 10.1007/s13593-021-00697-w.
- Crestey, T., J. Taylor et B. Tisseyre (2022). « Le Mas Numérique : A new model to promote on-farm innovation among digital service providers and to support adoption ». In : *First International Conference on Farmer-centric On-Farm Experimentation*.
- Daccache, A. (2014). « Water and energy footprint of irrigated agriculture in the Mediterranean region ». In : *Environ. Res. Lett.*, p. 13.

- Darnhofer, I., C. Lamine, A. Strauss et M. Navarrete (2016). « The resilience of family farms : Towards a relational approach ». In : *Journal of Rural Studies* 44, p. 111-122. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2016.01.013.
- Datta, S. et S. Taghvaeian (2023). « Soil water sensors for irrigation scheduling in the United States : A systematic review of literature ». In : *Agricultural Water Management* 278, p. 108148. DOI : 10.1016/j.agwat.2023.108148.
- De Fraiture, C., D. Molden et D. Wichelns (2010). « Investing in water for food, ecosystems, and livelihoods : An overview of the comprehensive assessment of water management in agriculture ». In : *Agricultural Water Management* 97.4, p. 495-501. DOI : 10.1016/j.agwat.2009.08.015.
- Del Río Castro, G., M. C. González Fernández et Á. Uruburu Colsa (2021). « Unleashing the convergence amid digitalization and sustainability towards pursuing the Sustainable Development Goals (SDGs) : A holistic review ». In : *Journal of Cleaner Production* 280, p. 122204. DOI : 10.1016/j.jclepro.2020.122204.
- Delalande, M., A. Gavaland, M. N. Mistou, P. Burger, F. Meunier, R. Marandel, G. Miglionico, S. Fargier et C. Doussan (2017). « Mesure de l'eau du sol : questions, méthodes et outils Exemples d'application sur deux plateformes champs du réseau " PHENOME " ». In : *Cahier des Techniques de l'INRA* 90. Publisher : INRA, p. 1-32.
- Derouiche, S., C. Mallet, A. Hannachi et Z. Bargaoui (2022). « Characterisation of rainfall events in northern Tunisia using self-organising maps ». In : *Journal of Hydrology : Regional Studies* 42, p. 101159. DOI : 10.1016/j.ejrh.2022.101159.
- Dieren, P., H. Van Meijl, A. Wolters et K. Bijak (2003). « Innovation adoption in agriculture : innovators, early adopters and laggards ». In : *Cahiers d'Economie et sociologie rurales* 67.1, p. 29-50. DOI : 10.3406/reae.2003.1714.
- Dobriyal, P., A. Qureshi, R. Badola et S. A. Hussain (2012). « A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management ». In : *Journal of Hydrology* 458-459, p. 110-117. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydro1.2012.06.021>.

- Döring, S. (2020). « Come rain, or come wells : How access to groundwater affects communal violence ». In : *Political Geography* 76, p. 102073. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2019.102073>.
- Drain, A., A. Shekar et N. Grigg (2019). « ‘ Involve me and I’ll understand ’ : creative capacity building for participatory design with rural Cambodian farmers ». In : *CoDesign* 15.2, p. 110-127. DOI : [10.1080/15710882.2017.1399147](https://doi.org/10.1080/15710882.2017.1399147).
- Duru, M., O. Therond, G. Martin, R. Martin-Clouaire, M.-A. Magne, E. Justes, E.-P. Journet, J.-N. Aubertot, S. Savary, J.-E. Bergez et J. P. Sarthou (2015). « How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services : a review ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 35.4, p. 1259-1281. DOI : [10.1007/s13593-015-0306-1](https://doi.org/10.1007/s13593-015-0306-1).
- Edeh, I. G., O. Mašek et W. Buss (2020). « A meta-analysis on biochar’s effects on soil water properties – New insights and future research challenges ». In : *Science of The Total Environment* 714, p. 136857. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2020.136857](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857).
- Errahj, M., M. Kuper, E. Abdellaoui, M. Mahdi et H. Kemmoun (2006). « Les adaptations de l’agriculture familiale en grande hydraulique : quelques enseignements de la plaine du Gharb, Maroc ». In : *L’avenir de l’agriculture irriguée en Méditerranée. Nouveaux arrangements institutionnels pour une gestion de la demande en eau. Actes du séminaire Wademed, Cahors, France, 6-7 novembre 2006*.
- Evelt, S. R., R. C. Schwartz, J. J. Casanova et L. K. Heng (2012). « Soil water sensing for water balance, ET and WUE ». en. In : *Agricultural Water Management* 104, p. 1-9. DOI : [10.1016/j.agwat.2011.12.002](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.002).
- Fabre, J., X. Louchart, R. Moussa, C. Dagès, F. Colin, M. Rabotin, D. Raclot, P. Lagacherie et M. Voltz (2010). « OpenFLUID : a software environment for modelling fluxes in landscapes ». In : *International Conference on Integrative Landscape Modelling*. Montpellier, France : Symposcience.

- Fan, X. K., P. T. Wu, W. Q. Niu, L. Zhang et F. Wang (2008). « The methods of improving system's irrigation uniformity under low-pressure drip irrigation ». In : *J. Irrig. Drain* 27, p. 18-20.
- FAO (2022). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point*. Main report. <https://doi.org/10.4060/cb9910en>. Rome : Routledge.
- Farooq, M., M. Hussain, S. Ul-Allah et K. H. M. Siddique (2019). « Physiological and agronomic approaches for improving water-use efficiency in crop plants ». In : *Agricultural Water Management* 219, p. 95-108. DOI : 10.1016/j.agwat.2019.04.010.
- Fernández-Mena, H., H. Frey, F. Celette, L. Garcia, K. Barkaoui, L. Hossard, A. Naulleau, R. Métral, C. Gary et A. Metay (2021). « Spatial and temporal diversity of service plant management strategies across vineyards in the south of France. Analysis through the Coverage Index ». In : *European Journal of Agronomy* 123, p. 126191. DOI : 10.1016/j.eja.2020.126191.
- Freeman, D. B. (1985). « The Importance of Being First : Preemption by Early Adopters of Farming Innovations in Kenya ». In : *Annals of the Association of American Geographers* 75.1, p. 17-28. DOI : 10.1111/j.1467-8306.1985.tb00055.x.
- Garrido-Momparler, V. et M. Peris (2022). « Smart sensors in environmental/water quality monitoring using IoT and cloud services ». en. In : *Trends in Environmental Analytical Chemistry* 35, e00173. DOI : 10.1016/j.teac.2022.e00173.
- Gascuel-Oudou, C., F. Lescourret, B. Dedieu, C. Detang-Dessendre, P. Favardin, L. Hazard et al. (2022). « A research agenda for scaling up agroecology in European countries ». en. In : *Agronomy for Sustainable Development* 42.3, p. 53. DOI : 10.1007/s13593-022-00786-4.
- Ghanbarian-Alavijeh, B., A. Liaghat, G.-H. Huang et M. T. Van Genuchten (2010). « Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data ». In : *Pedosphere* 20.4, p. 456-465. DOI : 10.1016/S1002-0160(10)60035-5.

- Ghazouani, W. et I. Mekki (2017). *Les ressources en eaux souterraines de la plaine de Haouaria, Tunisie*. IWMI Project Publication 7. International Water Management Institute.
- Gilley, J. R. et D. G. Watts (1977). « Energy reduction through improved irrigation practices ». In : *Agriculture and Energy*. Sous la dir. de W. Lockeretz. Academic Press, p. 187-203. DOI : 10.1016/B978-0-12-454250-1.50019-8.
- Gillies, M. H. et R. J. Smith (2015). « SISCO : surface irrigation simulation, calibration and optimisation ». In : *Irrigation Science* 33.5, p. 339-355. DOI : 10.1007/s00271-015-0470-8.
- Giordano, M. A., F. R. Rijsberman et R. M. Saleth (2006). *More crop per drop : revisiting a research paradigm : results and synthesis of IWMI's research, 1996-2005*. International Water Management Institute. OCLC : ocm86084423. London, UK : IWA Pub.
- González-Cebollada, C., D. Moret-Fernández, I. Buil-Moure et V. Martínez-Chueca (2016). « Optimization of Field Topography in Surface Irrigation ». In : *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142.8, p. 04016026. DOI : 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001041.
- Goulet, F., M. Meyer et C. Cardinael (2022). « Politiser l'équipement, équiper l'autonomie Enquête sur l'autoconstruction de matériel agricole en France ». In : *Ethnologie française* 52.2. Place : Paris cedex 14 Publisher : Presses Universitaires de France, p. 397-412. DOI : 10.3917/ethn.222.0397.
- Goumopoulos, C., B. O'Flynn et A. Kameas (2014). « Automated zone-specific irrigation with wireless sensor/actuator network and adaptable decision support ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 105, p. 20-33. DOI : 10.1016/j.compag.2014.03.012.
- Grafana Labs (2018). *Grafana Documentation*. URL : <https://grafana.com/docs/> (visité le 25/07/2019).
- Grafton, R. Q., J. Williams, C. J. Perry, F. Molle, C. Ringler, P. Steduto, B. Udall, S. A. Wheeler, Y. Wang, D. Garrick et R. G. Allen (2018). « The paradox of irrigation efficiency ». In : *Science* 361.6404, p. 748-750. DOI : 10.1126/science.aat9314.

- Gregg, E. S., J. Colton, M. A. Matin et T. J. Krupnik (2020). « Efficient and participatory design of scale-appropriate agricultural machinery workshops in developing countries : A case study in Bangladesh ». In : *Development Engineering* 5, p. 100046. DOI : 10.1016/j.deveng.2019.100046.
- Guillet, D. (2006). « Rethinking Irrigation Efficiency : Chain Irrigation in North-western Spain ». In : *Human Ecology* 34.3, p. 305-329. DOI : 10.1007/s10745-006-9020-6.
- Hamami, L. et B. Nassereddine (2020). « Application of wireless sensor networks in the field of irrigation : A review ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 179, p. 105782. DOI : 10.1016/j.compag.2020.105782.
- Hamze, M., B. Cheviron, N. Baghdadi, M. Lo, C. Dominique et M. Zribi (2023). « Detection of irrigation dates and amounts on maize plots from the integration of Sentinel-2 derived Leaf Area Index values in the Optirrig crop model ». In : *Agricultural Water Management* 283, p. 108315. DOI : 10.1016/j.agwat.2023.108315.
- Hendrickx, J. M., R. G. Allen, A. Brower, A. R. Byrd, S.-h. Hong, F. L. Ogden, N. R. Pradhan, C. W. Robison, D. Toll, R. Trezza, T. G. Umstot et J. L. Wilson (2016). « Benchmarking Optical/Thermal Satellite Imagery for Estimating Evapotranspiration and Soil Moisture in Decision Support Tools ». In : *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 52.1, p. 89-119. DOI : 10.1111/1752-1688.12371.
- Hermans, L. M., G. van Halsema et H. F. Mahoo (2006). « Building a mosaic of values to support local water resources management ». In : *Water Policy* 8.5, p. 415-434. DOI : 10.2166/wp.2006.051.
- Howell, T. A. (2003). « Irrigation Efficiency ». In : *Encyclopedia of Water Science*. Marcel Dekker.
- Huppert, W., M. Svendsen et D. L. Vermillion (2003). « Maintenance in Irrigation : Multiple Actors, Multiple Contexts, Multiple Strategies ». In : *Irrigation and Drainage Systems* 17.1, p. 5-22. DOI : 10.1023/A:1024940516158.
- Ibgui, P. (2021). *Analyse-diagnostic agraire de la plaine de la Crau, Bouches-du-Rhône, France*. Rapp. tech.

- Ihuoma, S. O. et C. A. Madramootoo (2017). « Recent advances in crop water stress detection ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 141, p. 267-275. DOI : 10.1016/j.compag.2017.07.026.
- InfluxDB* (2022). URL : <https://www.influxdata.com/>.
- Israelson, O. (1950). *Irrigation principles and practices*. Wiley. New York.
- Jana, S. K. et P. Tamang (2023). « Prospects of rehabilitation of ancient irrigation systems in India – A case study from coastal saline zone of West Bengal ». en. In : *Agricultural Systems* 207, p. 103638. DOI : 10.1016/j.agry.2023.103638.
- Jensen, M. (2007). « Beyond irrigation efficiency ». In : *Irrigation Science* 25.3, p. 233-245. DOI : 10.1007/s00271-007-0060-5.
- Joint Research Centre (2022). *Drought in Europe : July 2022 : GDO analytical report*. Rapp. tech. LU : Joint Research Centre, European Commission.
- Karthikeyan, L., I. Chawla et A. K. Mishra (2020). « A review of remote sensing applications in agriculture for food security : Crop growth and yield, irrigation, and crop losses ». In : *Journal of Hydrology* 586, p. 124905. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2020.124905.
- Kefi, S., O. Sboui, M. J.-F. Dubois et D. Rizzo (2023). « Le bricolage, au cœur des transitions agricoles vers la durabilité des agroéquipements. Les points critiques d'une fouille de données de vidéos YouTube ». In : *Cahiers COSTECH* 6. DOI : 10.5281/ZENODO.7905355.
- Keller, A. et J. Keller (1995). *Effective Efficiency : A Water Use Efficiency Concept For Allocating Freshwater Resources*. Rapp. tech. Center for Economic Policy Studies, p. 20.
- Kenny, U., Á. Regan, D. Hearne et C. O'Meara (2021). « Empathising, defining and ideating with the farming community to develop a geotagged photo app for smart devices : A design thinking approach ». In : *Agricultural Systems* 194, p. 103248. DOI : 10.1016/j.agry.2021.103248.
- Klaina, H., I. P. Guembe, P. Lopez-Iturri, M. Á. Campo-Bescós, L. Azpilicueta, O. Aghzout, A. V. Alejos et F. Falcone (2022). « Analysis of low power wide area network wireless technologies in smart agriculture for large-scale farm

- monitoring and tractor communications ». In : *Measurement* 187, p. 110231. DOI : 10.1016/j.measurement.2021.110231.
- Knox, J., J. Morris, E. Weatherhead et A. Turner (2000). « Mapping the financial benefits of sprinkler irrigation and potential financial impact of restrictions on abstraction : A case-study in Anglian Region ». In : *Journal of Environmental Management* 58.1, p. 45-59. DOI : 10.1006/jema.1999.0307.
- Koech, R., M. Haase, B. Grima et B. Taylor (2021). « Barriers and measures to improve adoption of irrigation technologies : A case study from the Bundaberg region in Queensland, Australia* ». In : *Irrigation and Drainage* 70.4, p. 909-923. DOI : 10.1002/ird.2583.
- Kooij, S. van der, M. Zwarteveen, H. Boesveld et M. Kuper (2013). « The efficiency of drip irrigation unpacked ». In : *Agricultural Water Management* 123, p. 103-110. DOI : 10.1016/j.agwat.2013.03.014.
- Lachia, N., L. Pichon, P. Marcq, J. Taylor et B. Tisseyre (2021). « Why are yield sensors seldom used by farmers – a French case study ». In : *Precision agriculture '21*, p. 745-751. DOI : 10.3920/978-90-8686-916-9_89.
- Lamaddalena, N., U. Fratino et A. Daccache (2007). « On-farm Sprinkler Irrigation Performance as affected by the Distribution System ». In : *Biosystems Engineering* 96.1, p. 99-109. DOI : 10.1016/j.biosystemseng.2006.09.002.
- Lamb, D. W., P. Frazier et P. Adams (2008). « Improving pathways to adoption : Putting the right P's in precision agriculture ». In : *Computers and Electronics in Agriculture. Emerging Technologies For Real-time and Integrated Agriculture Decisions* 61.1, p. 4-9. DOI : 10.1016/j.compag.2007.04.009.
- Lankford, B. (2006). « Localising irrigation efficiency ». In : *Irrigation and Drainage* 55.4, p. 345-362. DOI : 10.1002/ird.270.
- Lankford, B., A. Closas, J. Dalton, E. López Gunn, T. Hess, J. W. Knox et al. (2020). « A scale-based framework to understand the promises, pitfalls and paradoxes of irrigation efficiency to meet major water challenges ». In : *Global Environmental Change* 65, p. 102182. DOI : 10.1016/j.gloenvcha.2020.102182.

- Le Coz, J., A. Patalano, D. Collins, N. F. Guillén, C. M. García, G. M. Smart, J. Bind, A. Chiaverini, R. Le Boursicaud, G. Dramais et I. Braud (2016). « Crowdsourced data for flood hydrology : Feedback from recent citizen science projects in Argentina, France and New Zealand ». In : *Journal of Hydrology* 541, p. 766-777. DOI : 10.1016/j.jhydro1.2016.07.036.
- Liao, R., S. Zhang, X. Zhang, M. Wang, H. Wu et L. Zhangzhong (2021). « Development of smart irrigation systems based on real-time soil moisture data in a greenhouse : Proof of concept ». In : *Agricultural Water Management* 245, p. 106632. DOI : 10.1016/j.agwat.2020.106632.
- Liu, Z., Y. Xiao, Y. Li, B. Zhou, J. Feng, S. Han et T. Muhammad (2019). « Influence of operating pressure on emitter anti-clogging performance of drip irrigation system with high-sediment water ». In : *Agricultural Water Management* 213, p. 174-184. DOI : 10.1016/j.agwat.2018.10.017.
- Lu, H., H. Xie, Y. He, Z. Wu et X. Zhang (2018). « Assessing the impacts of land fragmentation and plot size on yields and costs : A translog production model and cost function approach ». en. In : *Agricultural Systems* 161, p. 81-88. DOI : 10.1016/j.agry.2018.01.001.
- Ludeña-Choez, J., J. J. Choquehuanca-Zevallos, A. Yasmany-Juarez, E. Mayhua-López, J. Zea, M. E. Talavera-Núñez, J. L. Magallanes-Magallanes et H. S. Pérez-Montaño (2022). « Capacitance sensitivity study of interdigital capacitive sensor based on graphene for monitoring Nitrates concentrations ». en. In : *Computers and Electronics in Agriculture* 202, p. 107361. DOI : 10.1016/j.compag.2022.107361.
- Luján Soto, R., J. De Vente et M. Cuéllar Padilla (2021). « Learning from farmers' experiences with participatory monitoring and evaluation of regenerative agriculture based on visual soil assessment ». In : *Journal of Rural Studies* 88, p. 192-204. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2021.10.017.
- Machenaud, G., P. Klein, F. Terrien et E. Pasco (2014). *Agroéquipements et triple performance : Freins et leviers pour la transition agroécologique*. Rapp. tech. MAAF (étude n°SSP-2013-092).

- Mailhol, J. C. et A. Merot (2008). « SPFC : a tool to improve water management and hay production in the Crau region ». In : *Irrigation Science* 26.4, p. 289-302. DOI : 10.1007/s00271-007-0099-3.
- Malaterre, P.-O., D. Dorchies et J.-P. Baume (2013). « La modernisation des canaux d'irrigation : apports de l'automatisation pour la gestion opérationnelle ». In : *Sciences Eaux & Territoires* Numéro 11.2, p. 44-47. DOI : 10.3917/set.011.0044.
- Masseroni, D., F. Gangi, A. Galli, R. Ceriani, C. De Gaetani et C. Gandolfi (2022). « Behind the efficiency of border irrigation : Lesson learned in Northern Italy ». In : *Agricultural Water Management* 269, p. 107717. DOI : 10.1016/j.agwat.2022.107717.
- Mateos, L. et J. L. Araus (2016). « Hydrological, engineering, agronomical, breeding and physiological pathways for the effective and efficient use of water in agriculture ». In : *Agricultural Water Management* 164, p. 190-196. DOI : 10.1016/j.agwat.2015.10.017.
- Mazoyer, M. et L. Roudart (1997). *Histoire des Agricultures du monde*. Seuil. Paris.
- McCampbell, M., C. Schumann et L. Klerkx (2022). « Good intentions in complex realities : Challenges for designing responsibly in digital agriculture in low-income countries ». In : *Sociologia Ruralis* 62.2, p. 279-304. DOI : 10.1111/soru.12359.
- McPhee, C., M. Bancercz, M. Mambrini-Doudet, F. Chrétien, C. Huyghe et J. Gracia-Garza (2021). « The Defining Characteristics of Agroecosystem Living Labs ». In : *Sustainability* 13, p. 1718. DOI : 10.3390/su13041718.
- Mekki, I., W. Ghazouani, A. Closas et F. Molle (2017). « Perceptions of groundwater degradation and mitigation responses in the Haouaria region in Tunisia ». In : *Groundwater for Sustainable Development* 5, p. 101-110. DOI : 10.1016/j.gsd.2017.05.001.
- Merot, A., J.-E. Bergez, A. Capillon et J. Wery (2008). « Analysing farming practices to develop a numerical, operational model of farmers' decision-making

- processes : An irrigated hay cropping system in France ». In : *Agricultural Systems* 98.2, p. 108-118. DOI : 10.1016/j.agsy.2008.05.001.
- Merot, A., J.-E. Bergez, D. Wallach et M. Duru (2008). « Adaptation of a functional model of grassland to simulate the behaviour of irrigated grasslands under a Mediterranean climate : The Crau case ». In : *European Journal of Agronomy* 29.4, p. 163-174. DOI : 10.1016/j.eja.2008.05.006.
- Merot, A., J. Wery, C. Isbérie et F. Charron (2008). « Response of a plurispecific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometers ». In : *European Journal of Agronomy* 28.1, p. 8-18. DOI : 10.1016/j.eja.2007.04.004.
- Merot, A. et J.-E. Bergez (2010). « IRRIGATE : A dynamic integrated model combining a knowledge-based model and mechanistic biophysical models for border irrigation management ». In : *Environmental Modelling & Software* 25.4, p. 421-432. DOI : 10.1016/j.envsoft.2009.11.003.
- Meyer, N., J.-E. Bergez, J. Constantin, P. Belleville et E. Justes (2020). « Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management ». In : *Agricultural Water Management* 231, p. 105998. DOI : 10.1016/j.agwat.2019.105998.
- Meyer, N., J.-E. Bergez, E. Justes et J. Constantin (2022). « Influence of cover crop on water and nitrogen balances and cash crop yield in a temperate climate : A modelling approach using the STICS soil-crop model ». In : *European Journal of Agronomy* 132, p. 126416. DOI : 10.1016/j.eja.2021.126416.
- Meynard, J.-M., B. Dedieu et A. P. Bos (2012). « Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices ». In : *Farming Systems Research into the 21st Century : The New Dynamic*. Sous la dir. d'I. Darnhofer, D. Gibbon et B. Dedieu. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 405-429. DOI : 10.1007/978-94-007-4503-2_18.
- Moëbs, M. (2018). *Etude du processus de questionnement des producteurs de Foin de Crau sur l'automatisation de leur système d'irrigation gravitaire : ses caractéristiques et son intégration au sein des dynamiques sociale et collective de gestion de l'eau*. Rapp. tech. AgroParisTech.

- Molden, D., H. Murray-Rust, R. Sakthivadivel et I. Makin (2003). « A water-productivity framework for understanding and action. » In : *Water productivity in agriculture : limits and opportunities for improvement*. Sous la dir. de J. W. Kijne, R. Barker et D. Molden. 1^{re} éd. UK : CABI Publishing, p. 1-18. DOI : 10.1079/9780851996691.0001.
- Molden, D., T. Oweis, P. Steduto, P. Bindraban, M. A. Hanjra et J. Kijne (2010). « Improving agricultural water productivity : Between optimism and caution ». In : *Agricultural Water Management* 97.4, p. 528-535. DOI : 10.1016/j.agwat.2009.03.023.
- Molden, D., R. Sakthivadivel, C. de Fraiture et W. Kloezen (1998). *Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agriculture Systems*. Rapp. tech. 20. Colombo, Sri Lanka : International Water Management Institute.
- Molle, B. et J. D. D. Bohorquez (2020). « Focus - Water savings in irrigation : some technical solutions available from companies ». In : *Sciences Eaux & Territoires* 34-BIS.
- Molle, F. (2006). « Cities Versus Agriculture : Revisiting Intersectoral Water Transfers, Potential Gains, and Conflicts ». In : *Comprehensive assessment research report*. T. 10. IWMI.
- Molle, F., C. Sanchis-Ibor et L. Avellà-Reus (2019). *Irrigation in the Mediterranean. Technologies, Institutions and Policies*. Global Issues in Water Policy 22. Springer International Publishing.
- Molle, F. et O. Tanouti (2017). « La micro-irrigation et les ressources en eau au Maroc : un coûteux malentendu ». In : *Alternatives rurales*, p. 18.
- Molle, F., P. Wester et P. Hirsch (2010). « River basin closure : Processes, implications and responses ». In : *Agricultural Water Management*. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture 97.4, p. 569-577. DOI : 10.1016/j.agwat.2009.01.004.
- Montes de Oca Munguia, O., D. J. Pannell, R. Llewellyn et P. Stahlmann-Brown (2021). « Adoption pathway analysis : Representing the dynamics and diversity of adoption for agricultural practices ». In : *Agricultural Systems* 191, p. 103173. DOI : 10.1016/j.agsy.2021.103173.

- Morgan, K. T., L. R. Parsons et T. Adair Wheaton (2001). « Comparison of laboratory- and field-derived soil water retention curves for a fine sand soil using tensiometric, resistance and capacitance methods ». In : *Plant and Soil* 234.2, p. 153-157. DOI : 10.1023/A:1017915114685.
- Morris, M. R., A. Hussain, M. H. Gillies et N. J. O'Halloran (2015). « Inflow rate and border irrigation performance ». In : *Agricultural Water Management* 155, p. 76-86. DOI : 10.1016/j.agwat.2015.03.017.
- Murgue, C., O. Therond et D. Leenhardt (2015). « Toward integrated water and agricultural land management : Participatory design of agricultural landscapes ». In : *Land Use Policy* 45, p. 52-63. DOI : 10.1016/j.landusepol.2015.01.011.
- National Research Council (1997). *Precision Agriculture in the 21st Century : Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Pages : 5491. Washington, D.C. : National Academies Press. DOI : 10.17226/5491.
- Nawandar, N. K. et V. R. Satpute (2019). « IoT based low cost and intelligent module for smart irrigation system ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 162, p. 979-990. DOI : 10.1016/j.compag.2019.05.027.
- Nie, W.-B., S.-X. Dong, Y.-B. Li et X.-Y. Ma (2021). « Optimization of the border size on the irrigation district scale – Example of the Hetao irrigation district ». In : *Agricultural Water Management* 248, p. 106768. DOI : 10.1016/j.agwat.2021.106768.
- Nie, W.-B., Y.-B. Li, F. Zhang et X.-Y. Ma (2019). « Optimal discharge for closed-end border irrigation under soil infiltration variability ». In : *Agricultural Water Management* 221, p. 58-65. DOI : 10.1016/j.agwat.2019.04.030.
- Njue, N., J. Stenfert Kroese, J. Gräf, S. Jacobs, B. Weeser, L. Breuer et M. Rufino (2019). « Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management : State of the art and future prospects ». en. In : *Science of The Total Environment* 693, p. 133531. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2019.07.337.

- Novara, A., A. Cerda, E. Barone et L. Gristina (2021). « Cover crop management and water conservation in vineyard and olive orchards ». In : *Soil and Tillage Research* 208, p. 104896. DOI : 10.1016/j.still.2020.104896.
- Novara, A., A. Pisciotta, M. Minacapilli, A. Maltese, F. Capodici, A. Cerdà et L. Gristina (2018). « The impact of soil erosion on soil fertility and vine vigor. A multidisciplinary approach based on field, laboratory and remote sensing approaches ». In : *Science of The Total Environment* 622-623, p. 474-480. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2017.11.272.
- OECD (2019). *Digital Opportunities for Better Agricultural Policies*. Paris : Organisation for Economic Co-operation et Development.
- Oksanen, T. (2013). « Shape-describing indices for agricultural field plots and their relationship to operational efficiency ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 98, p. 252-259. DOI : 10.1016/j.compag.2013.08.014.
- Olesen, J. E., M. Trnka, K. C. Kersebaum, A. O. Skjelvåg, B. Seguin, P. Peltonen-Sainio, F. Rossi, J. Kozyra et F. Micale (2011). « Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change ». In : *European Journal of Agronomy* 34.2, p. 96-112. DOI : 10.1016/j.eja.2010.11.003.
- Olioso, A., R. Lecerf, A. Baillieux, A. Chanzy, F. Ruget, O. Banton, P. Lecharpentier, F. Trolard et A.-L. Cognard-Plancq (2013). « Modelling of Drainage and Hay Production over the Crau Aquifer for Analysing Impact of Global Change on Aquifer Recharge ». In : *Procedia Environmental Sciences* 19, p. 691-700. DOI : 10.1016/j.proenv.2013.06.078.
- Orieschnig, C., J.-P. Venot, S. Massuel, K. E. Eang, K. Chhuon, S. Lun, S. Siev et G. Belaud (2022). « A Multi-Method Approach to Flood Mapping : Reconstructing Inundation Changes in the Cambodian Upper Mekong Delta ». In : *Journal of Hydrology* 610, p. 127902. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2022.127902.
- Ortuño, M. F., W. Conejero, F. Moreno, A. Moriana, D. S. Intrigliolo, C. Biel et al. (2010). « Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives ».

- In : *Agricultural Water Management* 97.1, p. 1-11. DOI : 10.1016/j.agwat.2009.09.008.
- Ostrom, E. et P. L. Delville (2009). « Pour des systèmes irrigués autogérés et durables : façonner les institutions ». In : *Coopérer aujourd'hui* 67.
- Ould Rebai, A., T. Hartani, M. N. Chabaca et M. Kuper (2017). « Une innovation incrémentielle : la conception et la diffusion d'un pivot d'irrigation artisanal dans le Souf (Sahara algérien) ». fr. In : *Cahiers Agricultures* 26.3, p. 35005. DOI : 10.1051/cagri/2017024.
- Oyonarte, N. A., H. Gómez-Macpherson, S. Martos-Rosillo, A. González-Ramón et L. Mateos (2022). « Revisiting irrigation efficiency before restoring ancient irrigation canals in multi-functional, nature-based water systems ». en. In : *Agricultural Systems* 203, p. 103513. DOI : 10.1016/j.agsy.2022.103513.
- Pandeya, B., W. Buytaert et C. Potter (2021). « Designing citizen science for water and ecosystem services management in data-poor regions : Challenges and opportunities ». en. In : *Current Research in Environmental Sustainability* 3, p. 100059. DOI : 10.1016/j.crsust.2021.100059.
- Pascon, P. (1980). « Etudes rurales. Idées et enquêtes sur la campagne marocaine. » In : Société marocaine des éditeurs réunis. Chap. Le technicien entre les bavures et le bricolage. P. 3-12.
- Pathak, H. S., P. Brown et T. Best (2019). « A systematic literature review of the factors affecting the precision agriculture adoption process ». In : *Precision Agriculture* 20.6, p. 1292-1316. DOI : 10.1007/s11119-019-09653-x.
- Paul, K., S. S. Chatterjee, P. Pai, A. Varshney, S. Juikar, V. Prasad, B. Bhadra et S. Dasgupta (2022). « Viable smart sensors and their application in data driven agriculture ». en. In : *Computers and Electronics in Agriculture* 198, p. 107096. DOI : 10.1016/j.compag.2022.107096.
- Pereira, L., P. Paredes et N. Jovanovic (2020). « Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach ». In : *Agricultural Water Management* 241, p. 106357. DOI : 10.1016/j.agwat.2020.106357.

- Pereira, L. S. et J. M. Gonçalves (2018). *Surface Irrigation*. DOI : 10.1093/acre/fore/9780199389414.013.248.
- Pereira, L. S., T. Oweis et A. Zairi (2002). « Irrigation management under water scarcity ». In : *Agricultural Water Management* 57.3, p. 175-206. DOI : 10.1016/S0378-3774(02)00075-6.
- Perret, S. R. et S. Payen (2020). « Irrigation and the environmental tragedy : pathways towards sustainability in agricultural water use ». In : *Irrigation and Drainage* 69.2, p. 263-271. DOI : 10.1002/ird.2404.
- Perry, C. (2007). « Efficient irrigation ; inefficient communication ; flawed recommendations ». In : *Irrigation and Drainage* 56.4, p. 367-378. DOI : 10.1002/ird.323.
- Perry, C., P. Steduto et F. Karajeh (2017). *Does improved irrigation technology save water ? A review of the Evidence. Discussion paper on irrigation and sustainable water resources management in the Near East and North Africa*. Rapp. tech. Cairo, Egypt : Food et Agriculture Organization (FAO), p. 57.
- Pierpaoli, E., G. Carli, E. Pignatti et M. Canavari (2013). « Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption : A Literature Review ». In : *Procedia Technology*. 6th International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment (HAICTA 2013) 8, p. 61-69. DOI : 10.1016/j.protcy.2013.11.010.
- Placidi, P., L. Gasperini, A. Grassi, M. Cecconi et A. Scorzoni (2020). « Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks ». In : *Sensors* 20.12, p. 3585. DOI : 10.3390/s20123585.
- Pramanik, M., M. Khanna, M. Singh, D. Singh, S. Sudhishri, A. Bhatia et R. Ranjan (2022). « Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system ». In : *Smart Agricultural Technology* 2, p. 100032. DOI : 10.1016/j.atech.2021.100032.
- Prost, L. (2021). « Revitalizing agricultural sciences with design sciences ». In : *Agricultural Systems* 193, p. 103225. DOI : 10.1016/j.agsy.2021.103225.
- Queyrel, W., B. Van Inghelandt, F. Colas, N. Cavan, S. Granger, B. Guyot, R. Reau, D. Derrouch, B. Chauvel, T. Maillot et N. Colbach (2023). « Combining

- expert knowledge and models in participatory workshops with farmers to design sustainable weed management strategies ». In : *Agricultural Systems* 208, p. 103645. DOI : 10.1016/j.agsy.2023.103645.
- Raes, D. et S. Geerts (2007). « Crop water productivity ». In : *International Workshop of UNESCO on the Sustainable Management of Marginal Drylands (SUMAMAD)*. T. 6. UNESCO.
- Ramos-Fuentes, I. A., Y. Elamri, B. Cheviron, C. Dejean, G. Belaud et D. Fumey (2023). « Effects of shade and deficit irrigation on maize growth and development in fixed and dynamic AgriVoltaic systems ». In : *Agricultural Water Management* 280, p. 108187. DOI : 10.1016/j.agwat.2023.108187.
- Renault, D. et W. W. Wallender (2000). « Nutritional water productivity and diets ». In : *Agricultural Water Management* 45.3, p. 275-296. DOI : 10.1016/S0378-3774(99)00107-9.
- Renault, D. (1993). « Modernisation de l'irrigation de surface : acquis et perspectives ». In : *La Houille Blanche* 79.2-3, p. 175-182. DOI : 10.1051/lhb/1993022.
- Richard, B., B. Bonté, M. Delmas, I. Braud, B. Cheviron, J. Veyssier et O. Barreteau (2022). « A co-simulation approach to study the impact of gravity collective irrigation constraints on plant dynamics in Southern France ». In : *Agricultural Water Management* 262, p. 107205. DOI : 10.1016/j.agwat.2021.107205.
- Robertson, D., M. Wood et Q. J. Wang (2004). « Estimating hydraulic parameters for a surface irrigation model from field conditions ». In : *Australian Journal of Experimental Agriculture* 44.2, p. 173. DOI : 10.1071/EA02191.
- Rodríguez-Díaz, J., E. Camacho-Poyato, R. López-Luque et L. Pérez-Urrestarazu (2008). « Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts : An application in Spain ». In : *Agricultural Systems* 96.1-3, p. 250-259. DOI : 10.1016/j.agsy.2007.07.010.
- Rogers, E. M. (1983). *Diffusion of innovations*. 3rd ed. New York : London : Free Press ; Collier Macmillan.

- Roussy, C., A. Ridier et K. Chaib (2015). « Adoption d'innovations par les agriculteurs : rôle des perceptions et des préférences ». In : *Working Paper SMART – LERECO* 15-03.
- Rudi, G. (2019). « Modélisation et analyse de services éco-hydrauliques des réseaux de canaux et fossés des agrosystèmes méditerranéens ». Thèse de doct.
- Sainlez, O. (2022). *Rendre l'innovation technologique accessible pour l'agriculture irriguée : étude de l'adoption d'un capteur capacitif « low-tech » d'humidité du sol sur un périmètre irrigué tunisien*. Rapp. tech.
- Salahou, M. K., X. Jiao et H. Lü (2018). « Border irrigation performance with distance-based cut-off ». In : *Agricultural Water Management* 201, p. 27-37. DOI : 10.1016/j.agwat.2018.01.014.
- Saos, J., G. Belaud, F. Charron et P. Le Goulven (2006). *Quantification des flux d'eau en irrigation gravitaire en Crau–Rapport final*. Rapp. tech. UMR G-Eau, Montpellier Supagro.
- Sarpong, D., G. Oforu, D. Botchie et F. Clear (2020). « Do-it-yourself (DiY) science : The proliferation, relevance and concerns ». In : *Technological Forecasting and Social Change* 158, p. 120127. DOI : 10.1016/j.techfore.2020.120127.
- SCET (2006). *Actualisation des connaissances hydrogéologiques et des données socio-économiques pour la plaine d'El Haouaria, Tunisie*. Rapp. tech. Tunis : Ministère de l'Agriculture Tunisien.
- Seckler, D. W. (1996). *The new era of water resources management : from "dry" to "wet" water savings*. Rapp. tech. OCLC : 35916923. Colombo, Sri Lanka : International Irrigation Management Institute.
- Serra-Wittling, C., B. Molle et B. Cheviron (2019a). « Plot level assessment of irrigation water savings due to the shift from sprinkler to localized irrigation systems or to the use of soil hydric status probes. Application in the French context ». In : *Agricultural Water Management* 223, p. 105682. DOI : 10.1016/j.agwat.2019.06.017.
- (2019b). « Plot level assessment of irrigation water savings due to the shift from sprinkler to localized irrigation systems or to the use of soil hydric

- status probes. Application in the French context ». In : *Agricultural Water Management* 223, p. 105682. DOI : 10.1016/j.agwat.2019.06.017.
- Shang, L., T. Heckelei, M. K. Gerullis, J. Börner et S. Rasch (2021). « Adoption and diffusion of digital farming technologies - integrating farm-level evidence and system interaction ». In : *Agricultural Systems* 190, p. 103074. DOI : 10.1016/j.agsy.2021.103074.
- Siad, S. M., V. Iacobellis, P. Zdruli, A. Gioia, I. Stavi et G. Hoogenboom (2019). « A review of coupled hydrologic and crop growth models ». en. In : *Agricultural Water Management* 224, p. 105746. DOI : 10.1016/j.agwat.2019.105746.
- Simunek, J., M. Sejna et M. T. Van Genuchten (1996). « HYDRUS-2D : Simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media ». In : *International Groundwater Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado*.
- SINERGI (2020). *Analyse prospective de la sensibilité de la nappe de la Crau aux conditions de recharge et de prélèvements pour définir les termes quantitatifs d'une gestion durable de la res- source à l'horizon 2050*. Rapport technique. SYMCRAU.
- Sirois-Cournoyer, A. (2018). *La nature du low-tech : un travail conceptuel et exploratoire*.
- Smith, M. et U. N. FAO (1992). *CROPWAT : A Computer Program for Irrigation Planning and Management*. Food & Agriculture Organization.
- Soulis, K. X., S. Elmaloglou et N. Dercas (2015a). « Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems ». In : *Agricultural Water Management* 148, p. 258-268. DOI : 10.1016/j.agwat.2014.10.015.
- (2015b). « Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems ». In : *Agricultural Water Management* 148, p. 258-268. DOI : 10.1016/j.agwat.2014.10.015.

- Steduto, P., T. C. Hsiao et E. Fereres (2007). « On the conservative behavior of biomass water productivity ». In : *Irrigation Science* 25.3, p. 189-207. DOI : 10.1007/s00271-007-0064-1.
- Stevens, J., G. Duvel, G. Steyn et W. Marobane (2005). *The range, distribution and implementation of irrigation scheduling models and methods in South Africa*. Rapp. tech. Water Research Commission.
- Tao, W., L. Zhao, G. Wang et R. Liang (2021). « Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 189, p. 106352. DOI : 10.1016/j.compag.2021.106352.
- Tey, Y. S. et M. Brindal (2012). « Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies : a review for policy implications ». In : *Precision Agriculture* 13.6, p. 713-730. DOI : 10.1007/s11119-012-9273-6.
- The Open Source Initiative* (2006).
- The Things Network* (2022). URL : <https://www.thethingsnetwork.org/>.
- Todorovic, M., E. E. Riezzo, V. Buono, M. Zippitelli, A. Galiano et V. Cantore (2016). « Hydro-tech : An automated smart-tech decision support tool for eco-efficient irrigation management ». In : *International Agricultural Engineering Journal* 25, p. 44-56.
- Toffolini, Q., M.-H. Jeuffroy, J.-M. Meynard, J. Borg, J. Enjalbert, A. Gauffreteau et al. (2020). « Design as a source of renewal in the production of scientific knowledge in crop science ». In : *Agricultural Systems* 185, p. 102939. DOI : 10.1016/j.agsy.2020.102939.
- Toreti, A., D. Bavera, J. Acosta Navarro, C. Cammalleri, A. de Jager, C. Di Ciollo et al. (2022). « Drought in Europe August 2022 ». In : DOI : 10.2760/264241.
- Turner, R. K. (2004). *Economic Valuation of Water Resources in Agriculture : From the Sectoral to a Functional Perspective of Natural Resource Management*. Google-Books-ID : coz0lmhjZAYC. Food & Agriculture Org.
- Van Halsema, G., B. Keddi Lencha, M. Assefa, H. Hengsdijk et J. Wesseler (2011). « Performance assessment of smallholder irrigation in the central rift

- valley of ethiopia ». In : *Irrigation and Drainage* 60.5, p. 622-634. DOI : 10.1002/ird.613.
- Van Halsema, G. et L. Vincent (2012). « Efficiency and productivity terms for water management : A matter of contextual relativism versus general absolutism ». In : *Agricultural Water Management* 108, p. 9-15. DOI : 10.1016/j.agwat.2011.05.016.
- Vandôme, P., G. Belaud, C. Leauthaud, S. Moinard, I. Mekki, A. Zairi, F. Charron, J. Leconte, I. Ferchichi et T. Ajmi (2022). « Exploring ways to improve agricultural water management on two Mediterranean irrigated systems : promises of wireless low-tech sensor networks ». In : *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences 2022 (submitted)*. DOI : 10.5194/iahs2022-90.
- Vandôme, P., C. Leauthaud, S. Moinard, O. Sainlez, I. Mekki, A. Zairi et G. Belaud (2023). « Making technological innovations accessible to agricultural water management : Design of a low-cost wireless sensor network for drip irrigation monitoring in Tunisia ». In : *Smart Agricultural Technology* 4, p. 100227. DOI : 10.1016/j.atech.2023.100227.
- Vandôme, P., S. Moinard, G. Brunel, B. Tisseyre, C. Leauthaud et G. Belaud (2023). « A low cost sensor to improve surface irrigation management ». In : *Precision Agriculture '23*. Wageningen Academic Publishers.
- Venot, J., C. B. Jensen, E. Delay et W. Daré (2022). « Mosaic glimpses : Serious games, generous constraints, and sustainable futures in Kandal, Cambodia ». In : *World Development* 151, p. 105779. DOI : 10.1016/j.worlddev.2021.105779.
- Venot, J., M. Kuper et M. Zwarteveen (2017). *Drip Irrigation for Agriculture. Untold stories of efficiency, innovation and development*. Routledge. Earthscan Studies in Water Resource Management. Taylor & Francis Group.
- Venot, J., H. Turrall, M. Samad et F. Molle (2007). « Shifting Waterscapes : Explaining Basin Closure in the Lower Krishna Basin, South India ». In : *IWMI Research Report*. T. 121. IWMI.

- Villafaña, S. R. (2018). *Modélisation spatio-temporelle des flux d'eau à l'échelle d'un périmètre irrigué par gravité*. Rapp. tech. Université de Montpellier, p. 53.
- Walker, W. (2003). *SIRMOD III-Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design (Guide and Technical Documentation)*. Logan, Utah (USA) : Utah State University (USU).
- Wang, S., H. Wang, Y. Zhang, R. Wang, Y. Zhang, Z. Xu, G. Jia, X. Wang et J. Li (2018). « The influence of rotational tillage on soil water storage, water use efficiency and maize yield in semi-arid areas under varied rainfall conditions ». In : *Agricultural Water Management* 203, p. 376-384. DOI : 10.1016/j.agwat.2018.03.007.
- Ward, F. A. (2010). « Financing Irrigation Water Management and Infrastructure : A Review ». In : *International Journal of Water Resources Development* 26.3, p. 321-349. DOI : 10.1080/07900627.2010.489308.
- Wheeler, S., E. Carmody, R. Grafton, R. Kingsford et A. Zuo (2020). « The rebound effect on water extraction from subsidising irrigation infrastructure in Australia ». In : *Resources, Conservation and Recycling* 159, p. 104755. DOI : 10.1016/j.resconrec.2020.104755.
- Xu, J., H. Cai, Q. Saddique, X. Wang, L. Li, C. Ma et Y. Lu (2019). « Evaluation and optimization of border irrigation in different irrigation seasons based on temporal variation of infiltration and roughness ». In : *Agricultural Water Management* 214, p. 64-77. DOI : 10.1016/j.agwat.2019.01.003.
- Zerihun, D., J. Feyen et J. M. Reddy (1996). « Sensitivity Analysis of Furrow-Irrigation Performance Parameters ». In : *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 122.1, p. 49-57. DOI : 10.1061/(ASCE)0733-9437(1996)122:1(49).
- Zhang, H., L. He, F. D. Gioia, D. Choi, A. Elia et P. Heinemann (2022). « Lo-RaWAN based internet of things (IoT) system for precision irrigation in plasticulture fresh-market tomato ». In : *Smart Agricultural Technology* 2, p. 100053. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100053>.

- Zhao, G., K. Lin, D. Chapman, N. Metje et T. Hao (2023). « Optimizing energy efficiency of LoRaWAN-based wireless underground sensor networks : A multi-agent reinforcement learning approach ». In : *Internet of Things* 22, p. 100776. DOI : 10.1016/j.iot.2023.100776.
- Zinkernagel, J., J. F. Maestre-Valero, S. Y. Seresti et D. S. Intrigliolo (2020). « New technologies and practical approaches to improve irrigation management of open field vegetable crops ». In : *Agricultural Water Management* 242, p. 106404. DOI : 10.1016/j.agwat.2020.106404.
- ZoebI, D. (2006). « Is water productivity a useful concept in agricultural water management ? » In : *Agricultural Water Management* 84.3, p. 265-273. DOI : 10.1016/j.agwat.2006.03.002.
- Zwart, S. J. et W. G. Bastiaanssen (2004). « Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize ». In : *Agricultural Water Management* 69.2, p. 115-133. DOI : 10.1016/j.agwat.2004.04.007.

Annexes

Annexe A

Guide d'entretien pour l'étude technico-économique de l'agriculture dans la plaine d'El Haouaria

Ce questionnaire a été utilisé auprès d'une trentaine d'agriculteurs de la plaine d'El Haouaria au printemps 2021.

Questionnaire agriculteurs | Date : _____ GDA : _____ Code : _____

Nom: _____ Genre: _____ Age: _____ Localité: _____ Telephone: _____ N° compteur: _____

Prendre points GPS interview

Informations globales sur le système de production

Foyer et main d'oeuvre

Membres du foyer: _____

Actifs sur l'exploitation: _____

Sources de revenu du foyer:

<input type="checkbox"/>	Agricole
<input type="checkbox"/>	Elevage
<input type="checkbox"/>	Pêche
<input type="checkbox"/>	Petit commerce
<input type="checkbox"/>	Main d'oeuvre agricole
<input type="checkbox"/>	Revenus non agricoles

Bilan du foncier:

SAU totale: _____

SAU irriguée GDA: _____

Foncier en propriété: _____

Foncier en métayage: _____

Foncier en fermage: _____

Vue d'ensemble de l'exploitation :

Parcelles, cultures, rotations, modes de faire valoir, topographie, bâti

1 sur 8

Partie A : Agro-économie

Remplir le tableau systèmes de culture (A3)

Infrastructures et équipement

Possédez-vous des bâtiments agricoles ? Si oui, de quel type (stockage, entrepôt matériel, transformation...).

Possédez-vous du matériel agricole ?

- Si oui, de quel type ? Acquis en quelle année ?

<input type="checkbox"/>	Motoculteur	<input type="checkbox"/>	Pulvérisateur	<input type="checkbox"/>	Moissonneuse	<input type="checkbox"/>	Pompe(s)	<input type="checkbox"/>	Consommable irrigation (rampes, goutteurs)
<input type="checkbox"/>	Tracteur	<input type="checkbox"/>	Herse	<input type="checkbox"/>	Semoir	<input type="checkbox"/>	Station de filtration	<input type="checkbox"/>	Autre: _____

- Si non, en louez-vous ? A qui et à quel prix ?

Possédez-vous un puits/forage individuel ? Si oui, de quelle profondeur ?

Elevage

- Pratiquez vous l'élevage ? Si oui, de quel type et combien de têtes ?

- Quels sont les types de production (lait/oeufs/viande) et la destination des produits ?

- Comment les bêtes sont-elles nourries et à quel prix (auto-consommation, achat de fourrage) ?

- Utilisez-vous le fumier comme fertilisant ? Si oui, sous quelle forme ?

Economie

• Avez-vous contracté un emprunt dans le cadre de votre activité agricole ? Si oui, pour quel motif et sous quelles conditions (banque, usurier, micro-crédit, taux d'intérêt) ?

• Avez-vous bénéficié de subventions de l'état ? Si oui, pour quel investissement et quel montant ?

• Quelle est la proportion de votre revenu agricole par rapport à votre revenu total ? (Check fiabilité)

Partie B : Gestion de l'eau

Ressource en eau et prise de décision

- Quelles sont vos sources d'eau d'irrigation (borne GDA, puits collectifs ou individuels, bassins, forages, autres...)? Pourquoi ces choix ?

- Pouvez-vous expliquer comment vous prenez la décision d'irriguer vos cultures (voisins, calendrier régulier, humidité du sol, météo, disponibilité de l'eau, état hydrique des cultures...)?

Culture	Prise de décision pour l'irrigation

- Comment percevez-vous l'état de la ressource en eau dans la région vis à vis de l'agriculture irriguée ?

	Abondante	Suffisante	Rare	Très rare
Aujourd'hui				
Dans le futur				

- Quelles sont les informations qui vous ont permis de répondre à cette question (niveau de la nappe, conflits entre usagers, restrictions, réduction des surfaces irriguées...)?

- Pouvez-vous détailler vos dépenses liées à l'irrigation ?

Infrastructures (puits, forage, bassin)	Redevance GDA (annuelle ou DV/m3 et conso)	Matériel extraction (pompe, transformateur ...)	Coûts de pompage (electrique/ hydrocarbure)	Système d'irrigation (rampes, goutteurs, filtres...)	Maintenance (creusement, réparations)

6 sur 8

Attentes et inclination à l'innovation

- Quelles sont les principales contraintes liées à votre système d'irrigation (coût, pénibilité et temps de travail, qualité des eaux, problèmes de disponibilité...)?

- Avez-vous déjà subi des pertes de rendement pour cause de sécheresse ? Si oui, sur quelle culture, à quel moment et pourquoi ? Pouvez vous quantifier la perte (%surface, %rendement, perte de revenu) ?

Mois/Année	Culture	Type de sécheresse (climatique, calendrier irrigation, disponibilité...)	Estimation des pertes

- Avez-vous développé des stratégies pour améliorer l'irrigation (système d'irrigation, dates de semis, variétés résistantes, pratiques culturales, autre...)?

• Avez vous récemment ou prévoyez-vous des changements d'assolement ? Si oui, pourquoi (marché, vulnérabilité climatique, simplification des pratiques...)?

• Avez vous récemment ou prévoyez-vous de nouveaux investissements agricoles liés à l'irrigation ? Si oui, de quel type (pompe, forage, système irrigation...)?

• Possédez-vous un smartphone ? Un ordinateur avec accès à internet ?

• Seriez-vous intéressé pour tester de nouveaux outils d'aide à l'irrigation (information sur les flux, aide à la décision, autre) ?

Annexe B

Exemple de calendrier d'irrigation au tour d'eau

Prise bourille		temps d'arrosage 5 j 07 h 12 min														
Arrosants : [REDACTED]		Ref Cadastrale [REDACTED]														
Droit d'eau : 56.66 ha		temps à l'ha 2 H 14		Débit : 109,03 l/s		Périodicité : 8.5 jours		Culture :								
Arrosants suivant : débute le tour				Arrosants suivant [REDACTED]												
mois	du	jusqu'au	du	jusqu'au	du	jusqu'au	du	jusqu'au	du	jusqu'au	du	jusqu'au	du	jusqu'au		
mars	1	05H00	6	12H12	9	17H00	15	00H12	18	05H00	23	12H12	26	17H00	1	00H12
avril	4	04H59	9	12H12	12	16H59	18	00H12	21	04H59	26	12H12	29	16H59	5	00H12
mai	8	04H59	13	12H12	16	17H00	22	00H12	25	05H00	30	12H12				
juin	2	17H00	8	00H12	11	05H00	16	12H12	19	17H00	25	00H12	28	05H00	3	12H12
juillet	6	17H00	12	00H12	15	05H00	20	12H12	23	17H00	29	00H12				
août	1	05H00	6	12H12	9	17H00	15	00H12	18	05H00	23	12H12	26	17H00	1	00H12
septembre	4	05H00	9	12H12	12	16H59	18	00H12	21	05H00	26	12H12	29	17H00	5	00H12
octobre	8	05H00	13	12H12	16	17H00	22	00H12	25	05H00	30	12H12				

Annexe C

Répartition des cultures sur le PPI d'Echraf, printemps été 2020

Parcelle du PPI d'Echraf pour la saison printemps été 2020, réalisé sur la base d'enquêtes par Insaf Mekki, pour le Ministère de l'Agriculture, des ressources hydrauliques et de la pêche de Tunisie.

ANNEXE C. RÉPARTITION DES CULTURES SUR LE PPI D'ECHRAF, PRINTEMPS ÉTÉ 2020



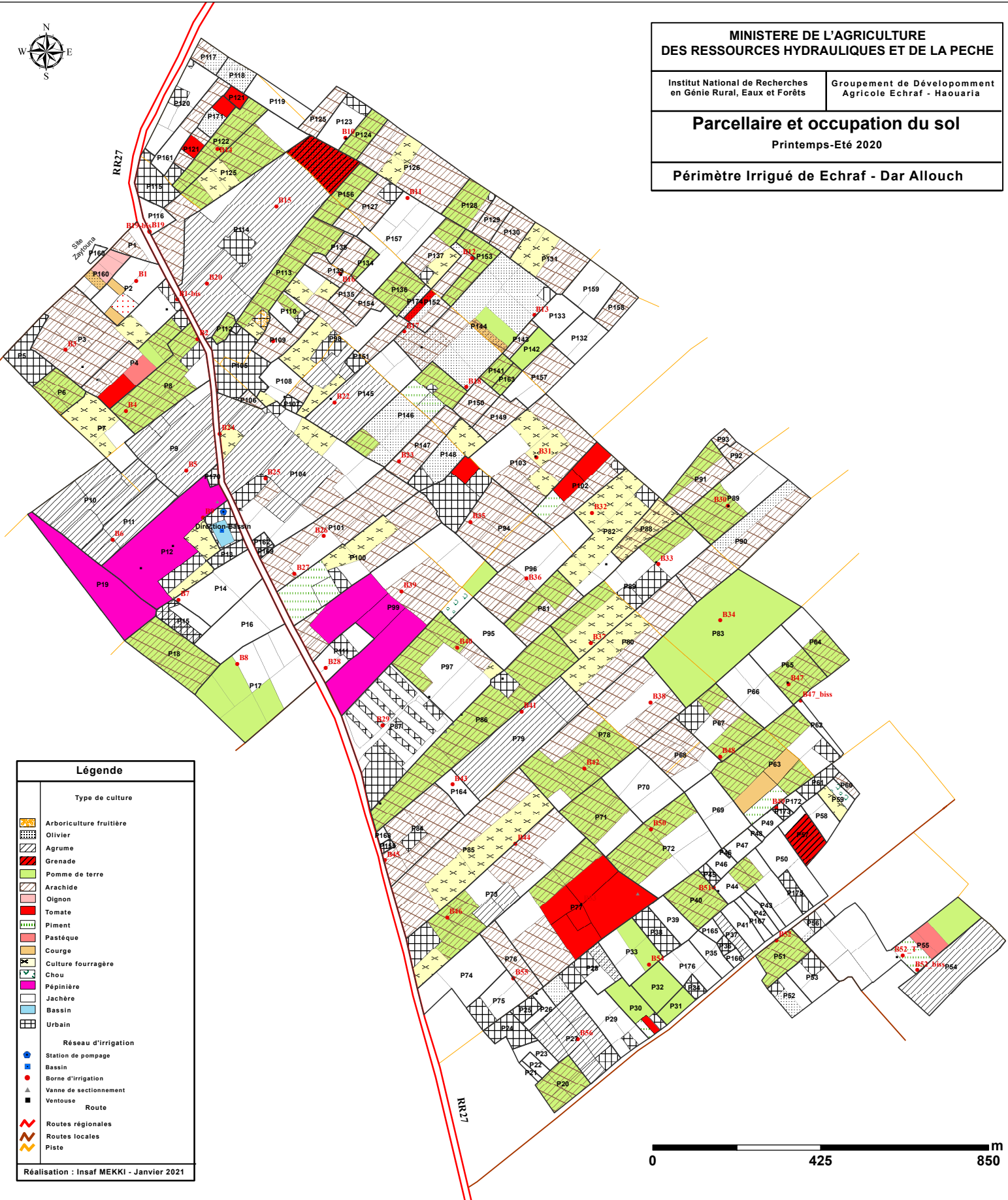
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
DES RESSOURCES HYDRAULIQUES ET DE LA PÊCHE

Institut National de Recherches
en Génie Rural, Eaux et Forêts

Groupement de Développement
Agricole Echraf - Haouaria

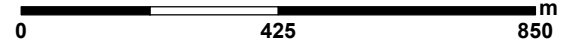
Parcellaire et occupation du sol
Printemps-Eté 2020

Périmètre Irrigué de Echraf - Dar Allouch



Légende	
Type de culture	
	Arboriculture fruitière
	Olivier
	Agrume
	Grenade
	Pomme de terre
	Arachide
	Oignon
	Tomate
	Piment
	Pastèque
	Courge
	Culture fourragère
	Chou
	Pépinière
	Jachère
	Bassin
	Urbain
Réseau d'irrigation	
	Station de pompage
	Bassin
	Borne d'irrigation
	Vanne de sectionnement
	Ventouse
	Route
	Routes régionales
	Routes locales
	Piste

Réalisation : Insaf MEKKI - Janvier 2021



Annexe D

Itinéraires techniques des principaux systèmes de culture sur le PPI d'Echraf

Présentation de synthèse des itinéraires techniques pratiqués pour les principaux systèmes de culture arboricoles et maraîchers du périmètre public irrigué d'Echraf, plaine d'El Haouaria, 2021.

ANNEXE D. ITK DES SYSTÈMES DE CULTURE DU PPI D'ECHRAF

Pomme de terre De saison	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III
Cycle												
Irrigation												
Labour	↑											
Herse + semis		↑										
Pesticides			↑	↑	↑	↑	↑	↑				
Engrais		↑	↑	↑	↑							

Citron 4 saisons	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III
Cycle	R R R		R R R					R R R				R R R
Irrigation			↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Taille				T								
Pesticides			↑	↑	↑	↑	↑	↑				
Engrais			↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Orange & mandarine	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III
Cycle	tardives						précoces				saison	
Irrigation							X X X X X X					
Taille	T		T								T	
Pesticides			↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Engrais			↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Olivier	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III
Cycle											R R R	
Irrigation												
Taille	T											

Fraise	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III
Cycle			1R 1R 2R 4R 4R 4R 4R 4R 4R 2R 2R									
Irrigation			V V V V V V V V V V V V						V			
Labour										↑		
Herse, paillage & semis										↑		
Engrais			↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑		

Fève	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III
Cycle						R						
Irrigation				V V V V V V V								
Labour												↑
Herse + semis		↑										
Pesticides												
Engrais		↑	↑	↑								

Tomate	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III
Cycle												
Irrigation				III III III III III III III III								
Labour			L H									
Desherbage				D	D	D						
Pesticides				P P P P P P P P P P								
Engrais				F DAP								

Piment	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III
Cycle												
Irrigation					X X X X X X X							
Labour				↑								
Herse + semis					↑	↑	↑	↑				
Pesticides					↑	↑	↑	↑				
Engrais					↑	↑	↑	↑				

Salade	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III
Cycle												
Irrigation			III III III III III									
Labour		↑										
Herse & semis		↑										

Coriandre	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III	I II III
Cycle												
Irrigation				I II II II II II II II								
Labour		↑										
Herse + semis		↑										
Engrais			↑									

Annexe E

Guide d'entretien : potentiel d'adoption du capteur Pilowtech.

Réalisé dans le cadre du stage de fin d'études ingénieur d'Oliver Sainlez, 2022,
et utilisé dans la plaine irriguée d'El Haouaria en Juin 2022.

Guide d'entretien : potentiel d'adoption du capteur Pilowtech

Présentation du projet et objectifs de l'entretien. Celui-ci va durer environ une heure. Est-ce que cela vous convient ? Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse, si vous ne connaissez pas la réponse dites-nous que vous ne savez pas.

Perception des enjeux de l'eau et pratiques d'irrigations

Thème A Perception de l'enjeu de l'eau

Pouvez-vous nous parler du rôle de l'eau sur votre exploitation ?

Comment percevez-vous l'état des ressources en eau disponible pour l'agriculture irriguée dans la région (autour de vous) ?

Comment pensez-vous que ces ressources vont évoluer dans les 20 prochaines années ?

	Abondante	Suffisante	Rare	Très rare
Aujourd'hui				
Dans le futur				

Thème B Les pratiques et ressources disponibles

Quelles sont les ressources en eau dont vous disposez ici ? (GDA, puit, forage ...) Pourquoi ces choix ?

Avez-vous une idée des volumes appliqués sur l'exploitation (global et par culture) ?

Connaissez-vous les volumes prélevés pour les différentes sources ?

Quel est le prix de l'eau pour les différentes sources ?

Quel matériel utilisez-vous pour irriguer ?

Pouvez-vous expliquer comment vous prenez la décision d'irriguer vos différentes cultures ?

Qui vous a enseigné ces pratiques ? Est-ce que vous avez déjà pensé à d'autres techniques ?

Besoin amont

Est-ce que vous pensez apporter la bonne quantité d'eau à vos cultures ? Pensez-vous être économe en eau ? (Non/pas vraiment/peut-être/surement/absolument)

Comment a évolué votre système d'irrigation ?

Avez-vous développé des stratégies pour améliorer l'irrigation ?

Voyez-vous des améliorations que vous pourriez mettre en place dans le futur ?

Thème C : Mise en perspective

Certaines régions, comme en Australie, ont connu des sécheresses à répétition. Le prix de l'eau a augmenté d'un facteur 5. Si la même situation avait lieu en Tunisie, c'est-à-dire avec un prix de l'eau à 1 dinar le m³, que feriez-vous ?

Comment feriez-vous évoluer vos pratiques ?

De même si les volumes d'eau étaient limités, que feriez-vous ? Comment feriez-vous évoluer vos pratiques ?

Présentation interactive du Pilowtech

Explication sur le fonctionnement du Pilowtech (petite vidéo/photos au champs pour montrer l'installation). Présentation et démonstration du montage du Pilowtech.

Présentation des deux modes de lecture de la donnée (en ligne ou sur le boîtier de lecture).

Evaluation de la prise en mains (notes de 0 à 4)

	0	1	2	3	4
Positionnement de la sonde					
Branchement du boîtier					
Lecture de la valeur boîtier					
Lecture de la valeur Grafana					
Prise en compte de la valeur					
Total					

Interprétation des valeurs fournies par le capteur.

Valeur %RU	Interprétation	Action envisagée
0%		
30%		
60%		
100%		

Comment trouvez-vous la prise en main du boîtier ? (Note agriculteur 0 à 5)

Est-ce que vous comprenez facilement la valeur affichée sur l'écran ? (Note 0 à 5)

Est-ce que vous avez des questions ?

Facteurs d'adoption

	0	1	2	3	4	5
Besoin exprimé						
Intérêt pour le capteur						
Facilité de prise en main (ingé + farmer)						
Facilité d'interprétation (ingé+farmer)						
Prix abordable						
Environnement favorable						

Thème D : Intérêts et besoins

Que pensez- vous de cette innovation, cette technologie ? (Note de 0 à 5)

Besoin aval

Quelle serait l'utilité du capteur pour vous ?

Est-ce que vous imaginez installer ce genre de capteur sur vos parcelles ?

Sur quelle culture pensez-vous l'installer, pourquoi ?

Etes-vous prêt à l'utiliser ? Pourquoi ?

Qu'est-ce qu'il vous manque pour pouvoir l'utiliser ?

Sous quelles conditions adopteriez-vous ce capteur ? (Classer les conditions)

Thème E : Accessibilité économique et technique

Economique

A votre avis combien coûte un boitier et une sonde ?

Quelle prix seriez-vous prêt à investir pour obtenir le capteur ?

Un capteur (2 sondes + boitier LCD ou 2 sondes + boitier connecté) coûte environ 60 dinars est ce que cela vous semble intéressant ? Pour affiner la précision il vaut mieux en avoir trois par ha (ou au moins une par culture) êtes-vous toujours intéressé ?

Aptitude technique

A quel point vous sentez-vous capable d'utiliser le capteur ?

Préférez-vous la lecture sur internet et smartphone, sur boitier ou les deux ? Pourquoi ?

Combien de temps êtes-vous prêt à donner pour construire et installer le capteur ?

Si le boitier demande une demi-journée à construire cela vous intéresse-t-il toujours ?

Si oui, seriez-vous intéressé par une formation pour construire le capteur ?

Préfériez-vous un modèle clé en main (mais 2x plus cher) ?

Thème F : Environnement favorable

A votre avis, où peut-on trouver les différentes pièces de ce capteur ?

Connaissez-vous quelqu'un qui pourrait bricoler ce capteur ?

Une partie des pièces n'est disponible uniquement à Tunis, comment feriez-vous pour récupérer les pièces ?

Est-ce que vous pourriez former un groupe pour les commandes, la construction et la réparation ?

Si membre d'un GDA, est-ce une bonne échelle ?

Ou envisagez-vous un autre groupe ? (voisins, autre groupe d'agriculteurs...)

Informations sur le système de production

Fonction sur l'exploitation : _____

Membres du foyer : _____

Nombre d'actifs sur l'exploitation : _____

Système de production : _____

Bilan du foncier : SAU totale : _____ SAU irriguée : _____

Répartition des cultures :

Culture	Surface	Source

Talon sociologique

Sexe : _____

Année de naissance : _____

Lieu de naissance : _____

Nationalité : _____

Profession actuelle et passée : _____

Formation : _____

Si pas d'étude (savez-vous lire et écrire et compter ?)

Lieu d'habitation : _____

Supports d'illustration présentés au cours de l'entretien



Annexe F

Tutoriel de fabrication du WatAr

Ce tutoriel a été réalisé dans le cadre du projet de recherche HubIS.

Auteurs : Paul Vandôme, Simon Moinard.

Tutoriel de construction du système WatAr



Préambule

Le WatAr est un capteur connecté développé pour faciliter la gestion de l'irrigation de surface dans le cadre du projet de recherche HubIS (UMR Geau, UMR ITAP). C'est un système à construire soi-même, à bas coût et open source, capable de communiquer à distance des informations de présence/absence d'eau sur la parcelle. Positionné à l'aval des planches d'irrigation, il permet d'alerter les irrigants lorsque la lame d'eau a atteint le capteur.

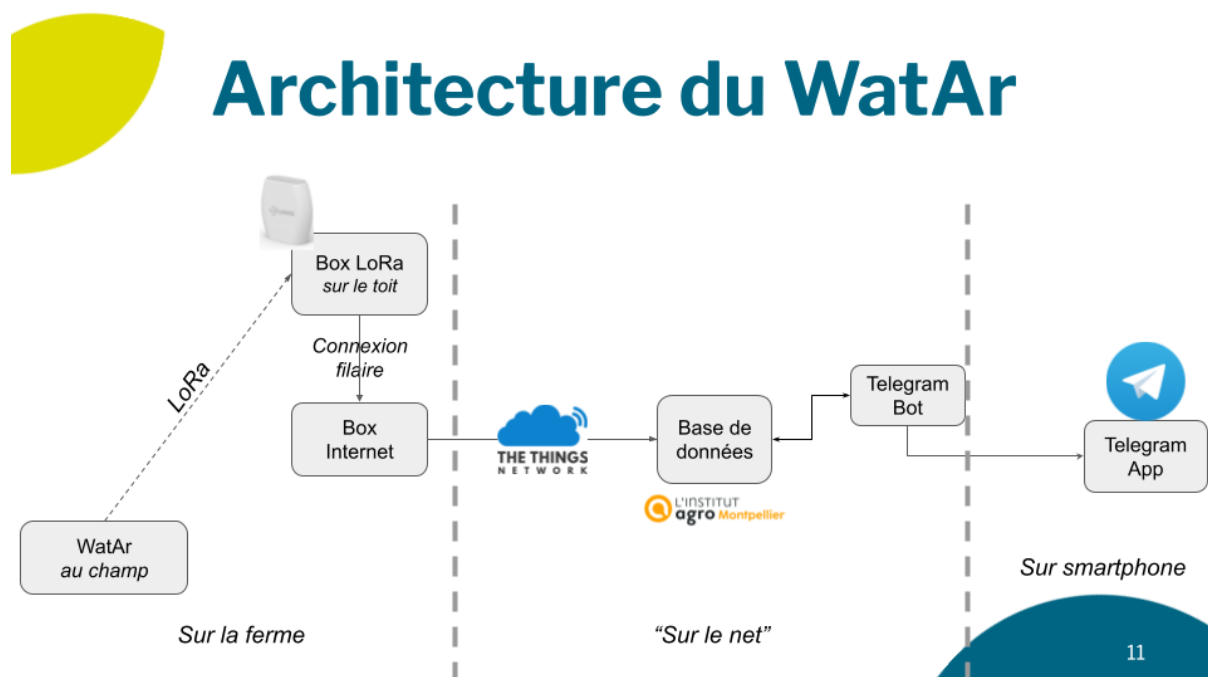
Il est nécessaire d'être couvert par un réseau LoRa The Things Network sur l'exploitation. Le domaine du Merle (plaine de la Crau) a été équipé pour la couverture réseau LoRa (voir [ce tutoriel](#)).



Contacts et crédits : Paul Vandôme (paul.vandome@supagro.fr), Simon Moinard (simon.moinard@supagro.fr).

Publication : *A low cost sensor to improve surface irrigation management*, Vandôme et al., Precision Agriculture, 2023.

L'architecture globale du système est présentée ci-dessous. Le WatAr envoie l'état de son flotteur (0-bas ou 1-haut) à l'antenne LoRa installée au domaine, qui transmet la donnée sur internet vers le serveur "The Things Network". La donnée est ensuite dirigée vers une base de données. Lorsque le flotteur change d'état, un message est envoyé à l'utilisateur via l'application de messagerie Telegram.



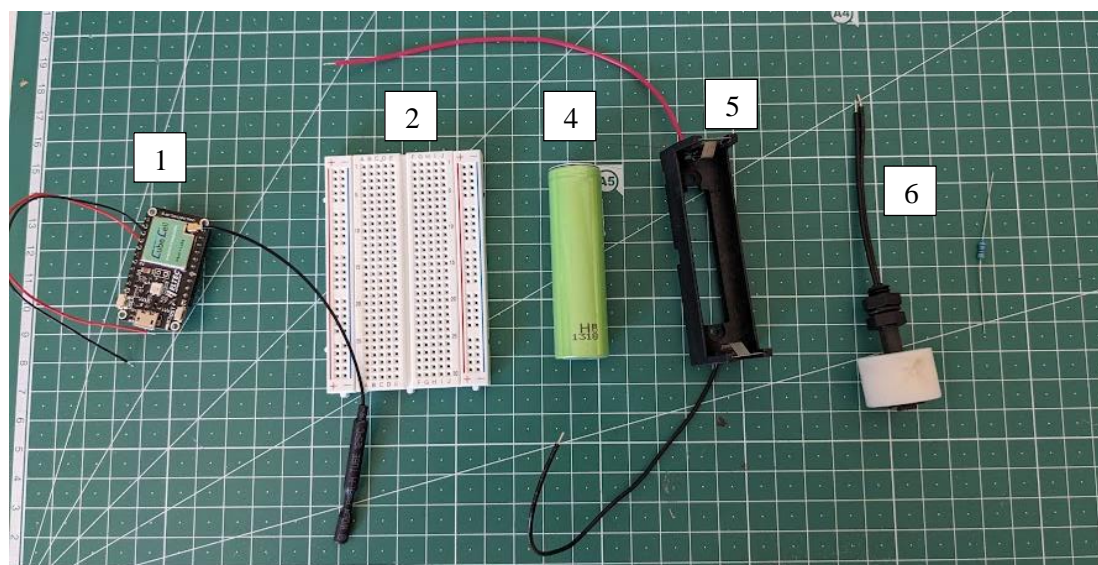
Le tutoriel est décomposé en plusieurs étapes :

1. Dans un premier temps, nous allons assembler les composants du WatAr.
2. Nous allons déclarer virtuellement le nouveau WatAr en ligne sur le cloud [The Things Network](#). Le site nous procure alors les codes d'accès, ou identifiants, propres au nouveau WatAr.
3. Ces codes d'accès sont renseignés au WatAr construit, par programmation sur le logiciel Arduino, pour qu'il puisse envoyer ses données sur internet via The Things Network.
4. On valide la bonne communication du capteur en vérifiant que les données sont transmises en ligne après alimentation du WatAr.
5. Enfin, nous établissons l'alerte de messagerie via l'application Telegram. Les identifiants du WatAr sont renseignés au « bot », sorte de pilote automatique pour la direction des données. Les alertes seront alors envoyées dans la conversation Telegram en cas de changement d'état du flotteur!

1. Construction du capteur

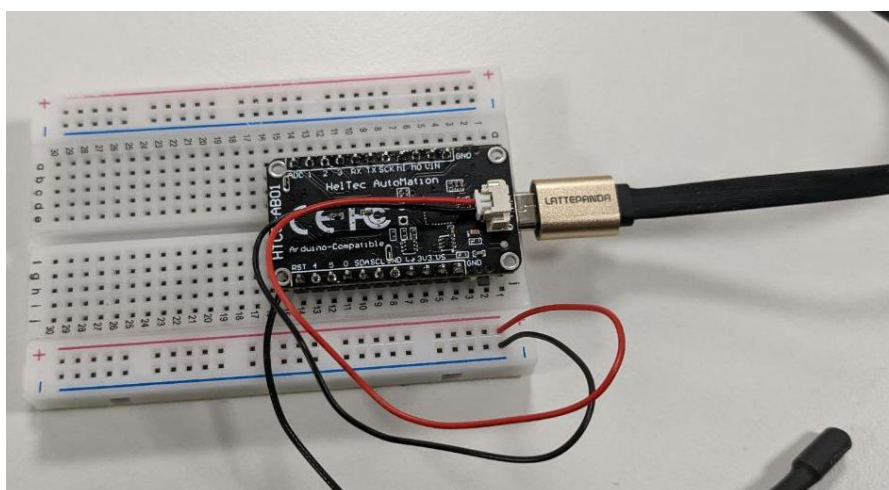
Liste du matériel nécessaire à la fabrication du capteur :

1. Une carte [Cubecell HTC01 868MHz](#) (20€)
2. Une [petite breadboard](#) (2€)
3. Un [câble USB - micro USB DATA](#) (2€)
4. Une [pile LiPo 18650](#) (2€)
5. Un [support de pile LiPo](#) (0.5€)
6. Un [flotteur](#) (1€)



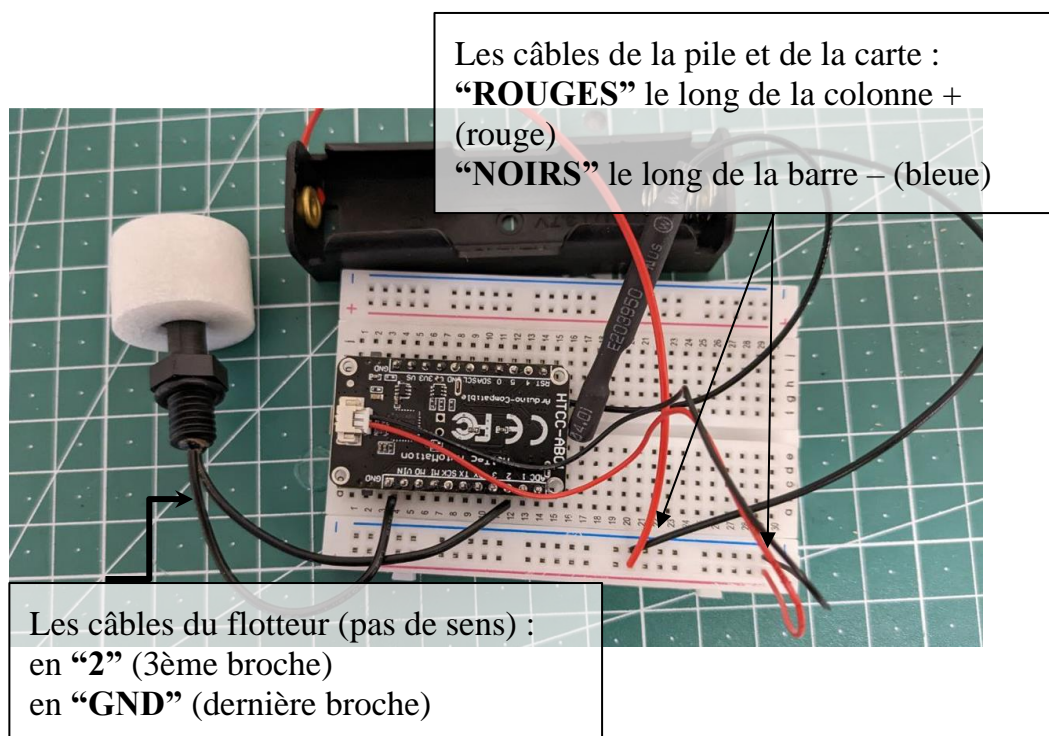
On commence par sortir la carte Cubecell de sa boîte. C'est le cerveau du WatAr (microcontrôleur), qui va se réveiller toutes les 3 minutes pour regarder l'état du flotteur (en bas ou en haut), et communiquer la donnée.

On fixe la carte sur la breadboard, comme ceci :



On connecte ensuite les composants entre eux via la breadboard :

- D'abord le flotteur. On place un câble (au choix) dans le trou en face de la broche nommée "2" (la 3ème) de la carte Cubecell, puis l'autre câble dans le trou en face de la broche "GND" (la dernière de sa rangée).
- Puis l'alimentation de la carte : les deux câbles rouges sont à placer au choix sur la colonne + (ligne rouge) de la breadboard et les deux câbles noirs sur la colonne - (ligne bleue).



La première étape est finie, le WatAr est construit ! (on le mettra dans une boîte en fin de montage).

L'étape suivante consiste à déclarer "*virtuellement*" votre WatAr en ligne sur le cloud The Things Network pour que notre objet connecté puisse envoyer ses données sur internet.

2. La déclaration du WatAr

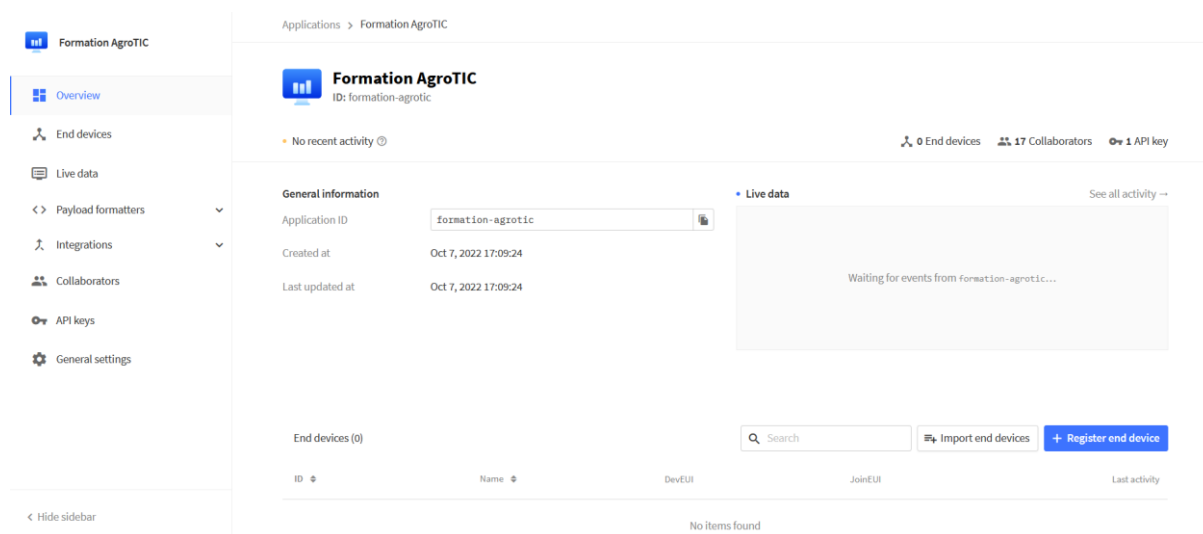
Rendez-vous sur le site [The Things Network](https://www.thingsnetwork.io/). C'est ici que l'on va déclarer les objets connectés, puis observer les données remontantes.

Si c'est votre première visite, il faut d'abord créer un compte. Un mail de confirmation vous sera envoyé, qu'il faut impérativement valider !

La première page nous indique si l'on veut aller dans les applications (les flottes d'objets connectés) ou les gateways (les antennes relais installées sur les toits) : cliquez sur « applications ».

ANNEXE F. TUTORIEL DE FABRICATION DU WATAR

On peut facilement créer une application. Dans le cadre de ce tutoriel vous allez utiliser une application déjà existante : tournez-vous vers un encadrant pour vous donner accès à l'application **formation-agrotic** !



La page d'accueil contient des onglets à gauche :

- **End devices** : c'est ici que l'on déclare et consulte les objets connectés. Il y a un aperçu de cette page en bas de la page d'accueil.
- **Live data** : on peut voir ici toutes les données remonter. Il y a aussi un aperçu à droite de la page d'accueil.
- **Le reste** n'est pas nécessaire dans le cadre de ce tuto !

On clique sur le bouton **+ Register end device**. Sur la nouvelle page, on sélectionne "Enter end device specifics manually" puis on renseigne :

- **Frequency plan** : choisir Europe 863-870 MHz. *C'est la fréquence de communication de LoRa en Europe*
- **LoRaWAN version** : choisir LoRaWAN Specification 1.0.2 *C'est le protocole de communication utilisé par notre carte*
- **Regional Parameters version** : choisir RP001 Regional Parameters 1.0.2

End device type

Input Method

- Select the end device in the LoRaWAN Device Repository
- Enter end device specifics manually

Frequency plan

Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2 - recommended) | v

LoRaWAN version

LoRaWAN Specification 1.0.2 | v

Regional Parameters version

RP001 Regional Parameters 1.0.2 | v

- Un nouveau champ **JoinEUI** apparaît : le

Provisioning information

JoinEUI

00 00 00 00 00 00 00 00

Confirm

remplir de zéros puis cliquer sur **Confirm**.

ANNEXE F. TUTORIEL DE FABRICATION DU WATAR

Des nouveaux champs apparaissent :

- **DevEUI** : cliquer sur Generate C'est l'identifiant de l'objet connecté que l'on va créer
- **AppKey** : Cliquer sur Generate C'est le mot de passe de l'objet connecté
- **End device ID** : C'est le nom du futur objet connecté. Choisissez *watar-vos_initiales* tout en minuscule : par exemple, **watar-pv**

DevEUI ⓘ *

AppKey ⓘ *

End device ID ⓘ *

my-new-device

This value is automatically prefilled using the DevEUI

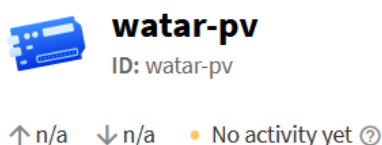
After registration

View registered end device

Register another end device of this type

Register end device

Cliquer sur **Register end device**. On arrive sur la page du watar déclaré. Il n'a jamais été actif :



A noter la partie droite **Live data**, qui liste chaque activité. C'est ici que seront affichées les données venant du WatAr.

La partie qui nous intéresse est **Activation information**. Ce sont les fameux codes d'accès dont on a besoin !

Activation information

AppEUI

DevEUI

AppKey

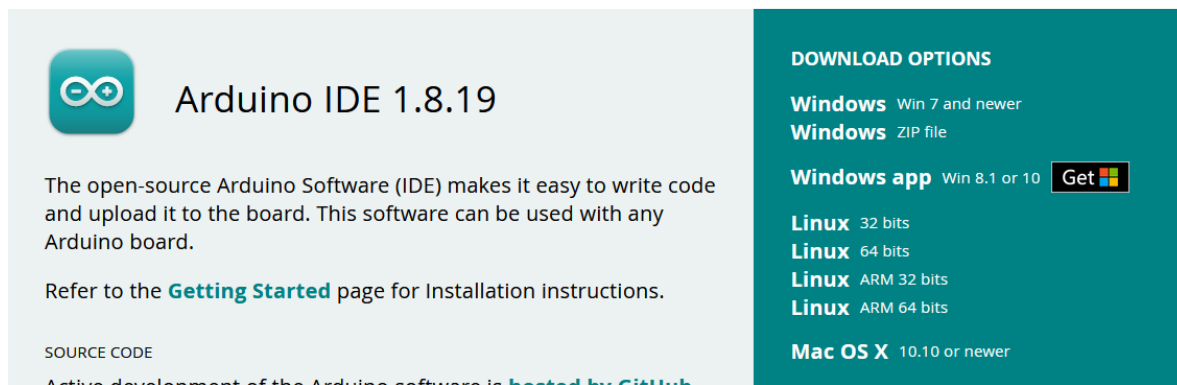
Revenir à la page d'accueil en cliquant sur End devices: on remarque au passage que l'objet connecté déclaré est bien affiché dans la partie End devices en bas.

Le WatAr est maintenant déclaré virtuellement, il faut maintenant renseigner les codes d'accès à notre WatAr construit ! On laisse cette page de côté pour le moment.

3. Installer Arduino et le paramétrer

Arduino IDE est un logiciel qui va nous permettre d'envoyer les codes d'accès sur la carte Cubecell. Il faut au préalable installer le [logiciel Arduino](#) sur son ordinateur. **Choisissez l'installation de la version 1.8 pour votre ordinateur (Windows, linux, mac, etc) :**

Downloads



Arduino IDE 1.8.19

The open-source Arduino Software (IDE) makes it easy to write code and upload it to the board. This software can be used with any Arduino board.

Refer to the [Getting Started](#) page for Installation instructions.

SOURCE CODE

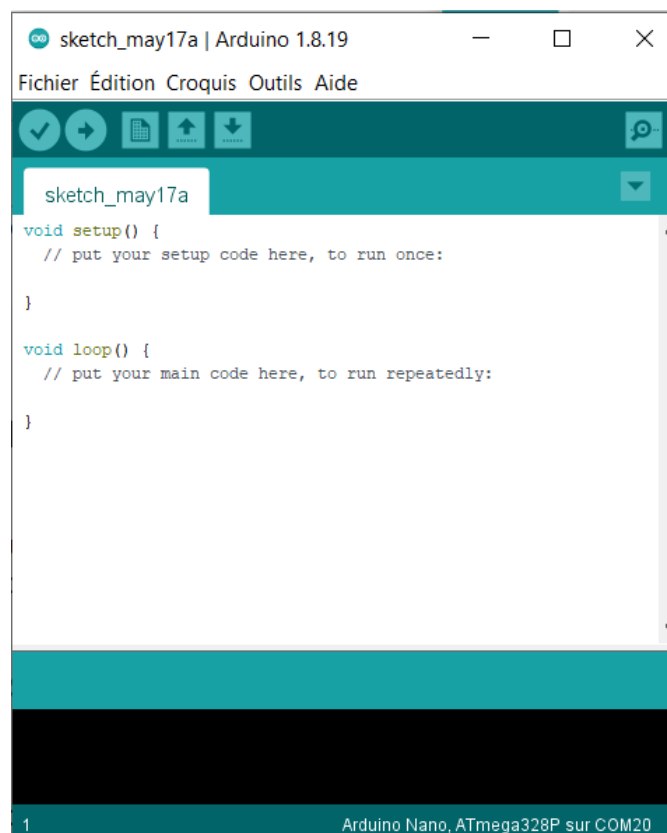
Active development of the Arduino software is hosted by GitHub

DOWNLOAD OPTIONS

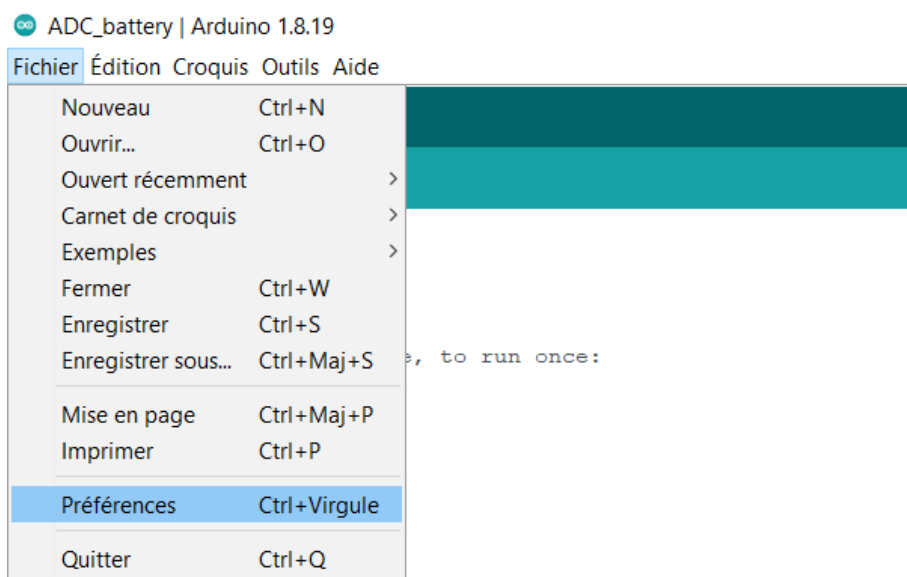
- Windows** Win 7 and newer
- Windows** ZIP file
- Windows app** Win 8.1 or 10 [Get](#)
- Linux** 32 bits
- Linux** 64 bits
- Linux** ARM 32 bits
- Linux** ARM 64 bits
- Mac OS X** 10.10 or newer

L'installation demandera quelques autorisations, qu'il faudra accepter.

Une fois installé, on lance le logiciel Arduino. Une fenêtre s'ouvre :

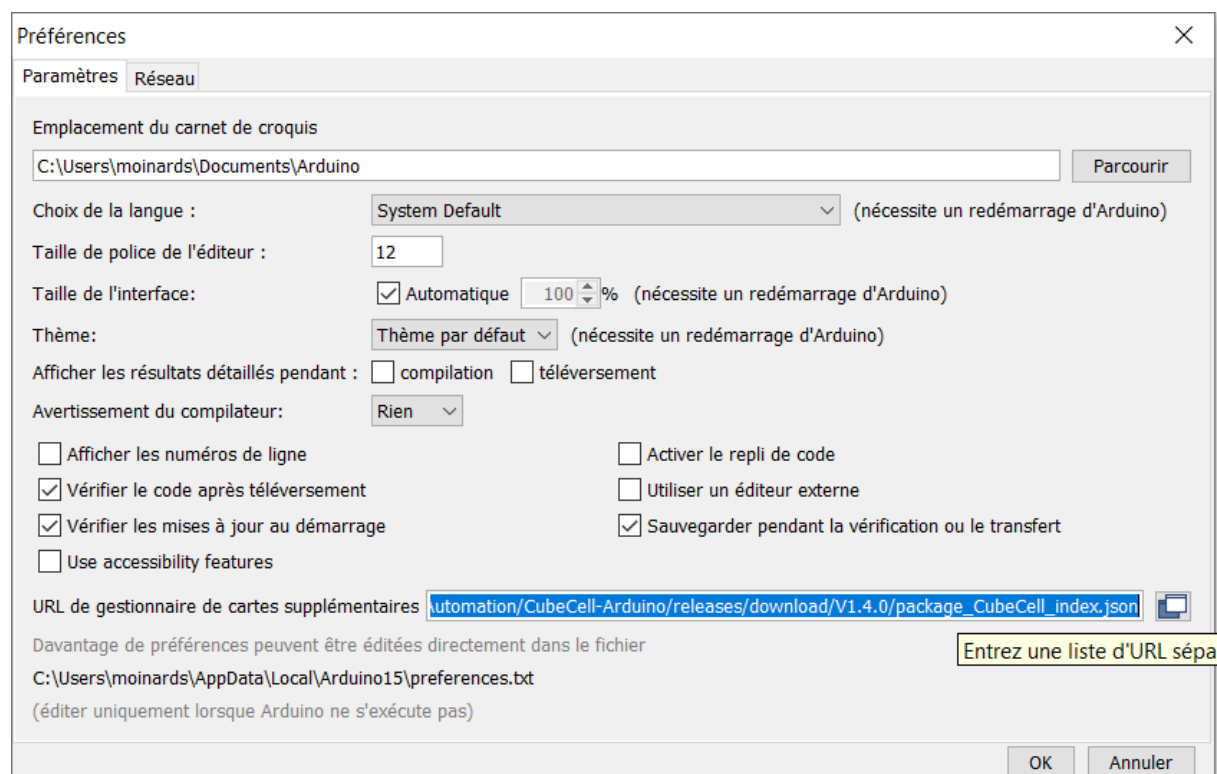


On doit juste informer le logiciel que notre carte est une Cubecell. Pour cela, on va dans **Fichier>Préférences**



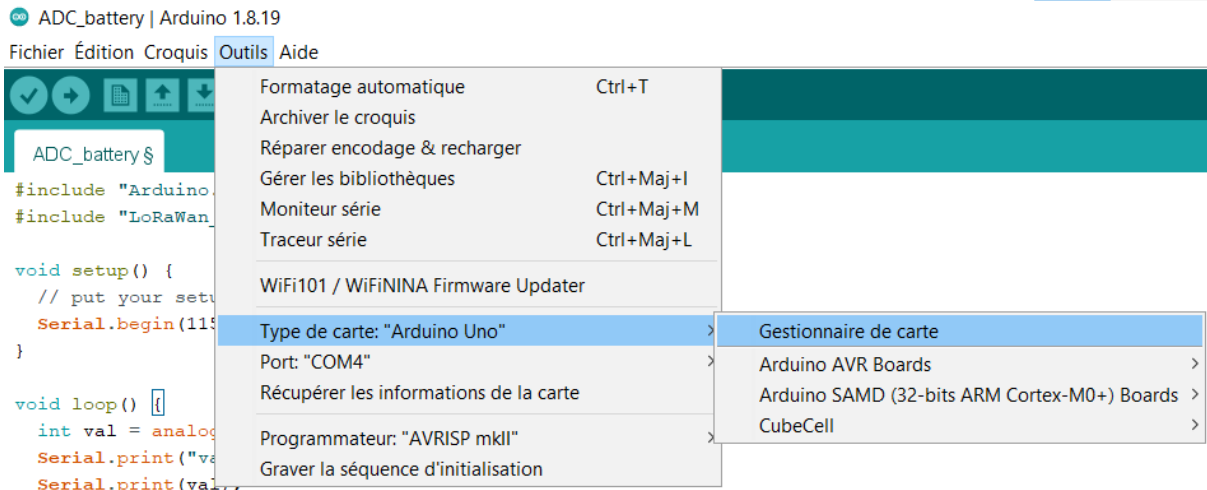
Dans la nouvelle fenêtre, on cherche **URL de gestionnaire de cartes supplémentaires** et on y colle le texte suivant, puis cliquer sur OK

https://github.com/HeITecAutomation/CubeCell-Arduino/releases/download/V1.4.0/package_CubeCell_index.json

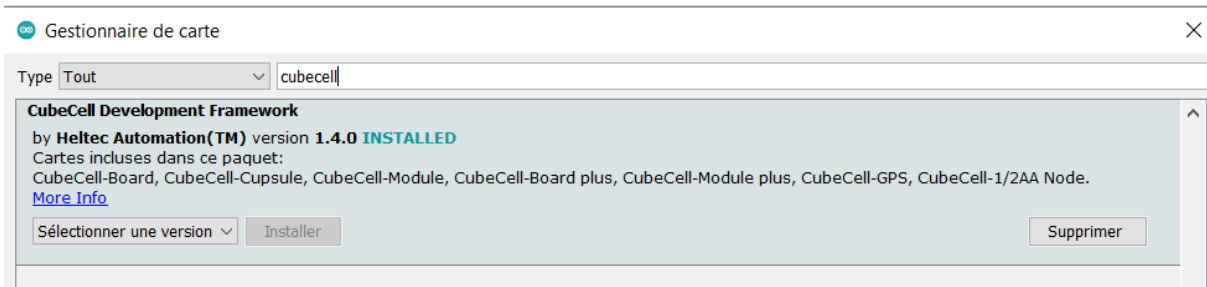


On ouvre maintenant **Outils > Type de cartes > Gestionnaire de Cartes**

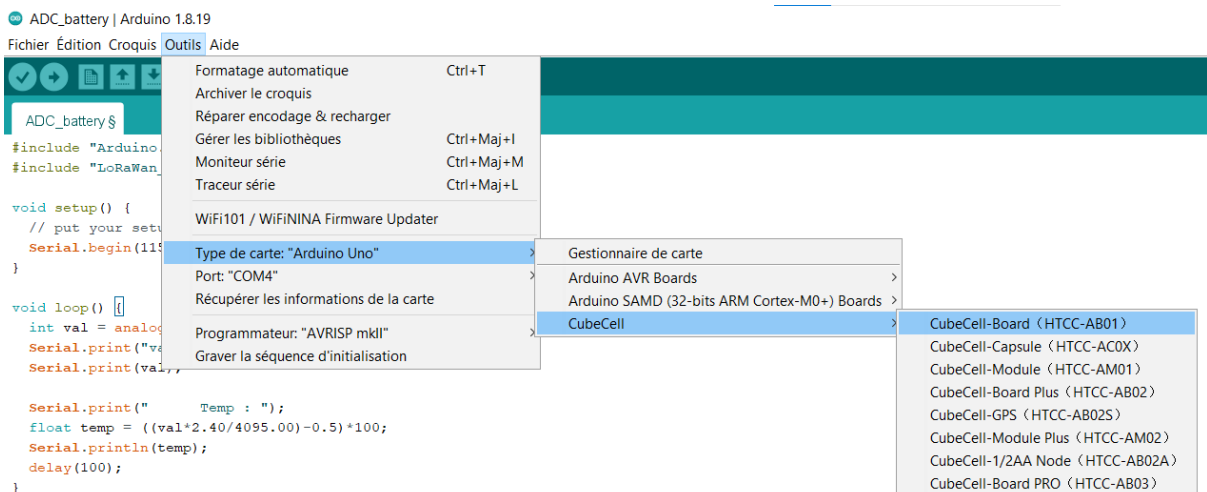
ANNEXE F. TUTORIEL DE FABRICATION DU WATAR



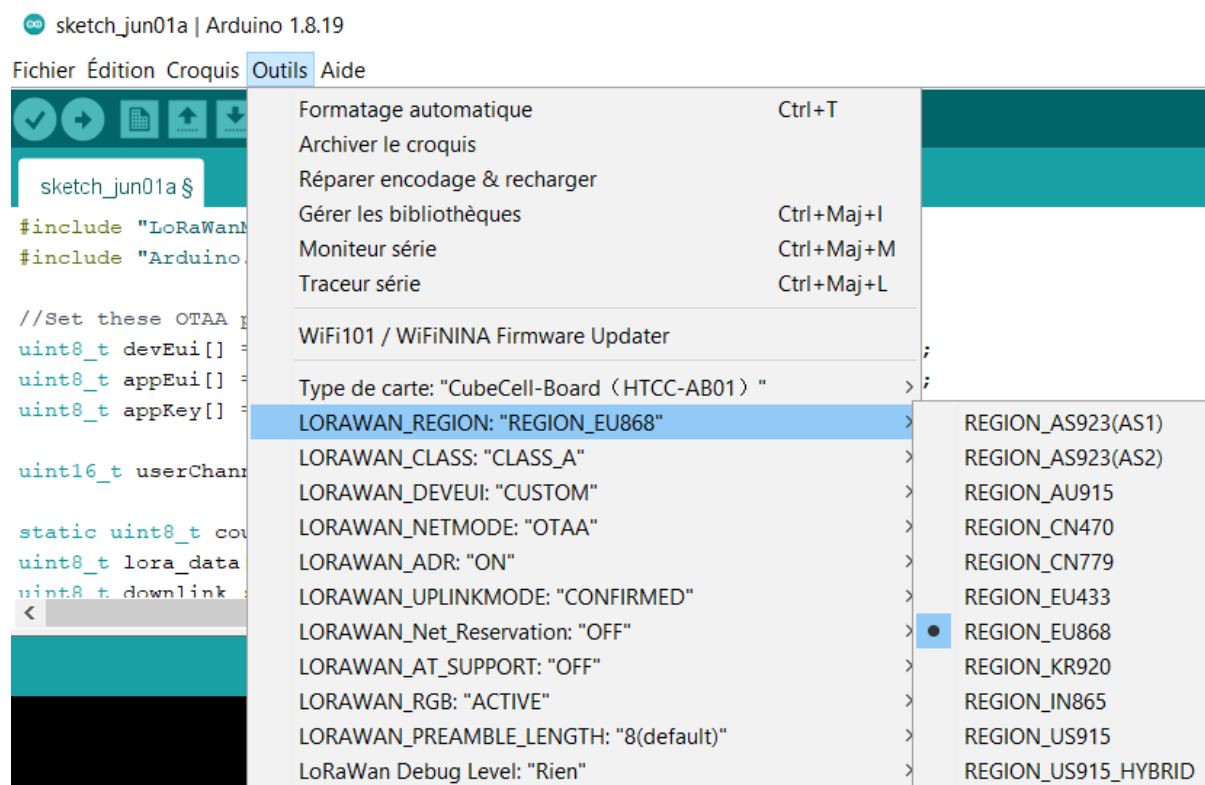
On recherche depuis la barre de recherche **Cubecell**. Une librairie est détectée : **CubeCell Development Framework**. On clique sur Installer. L'installation peut prendre 1min.



On sélectionne la carte utilisée dans **outils > Type de Carte > CubeCell > CubeCell Module (HTCC01)** :

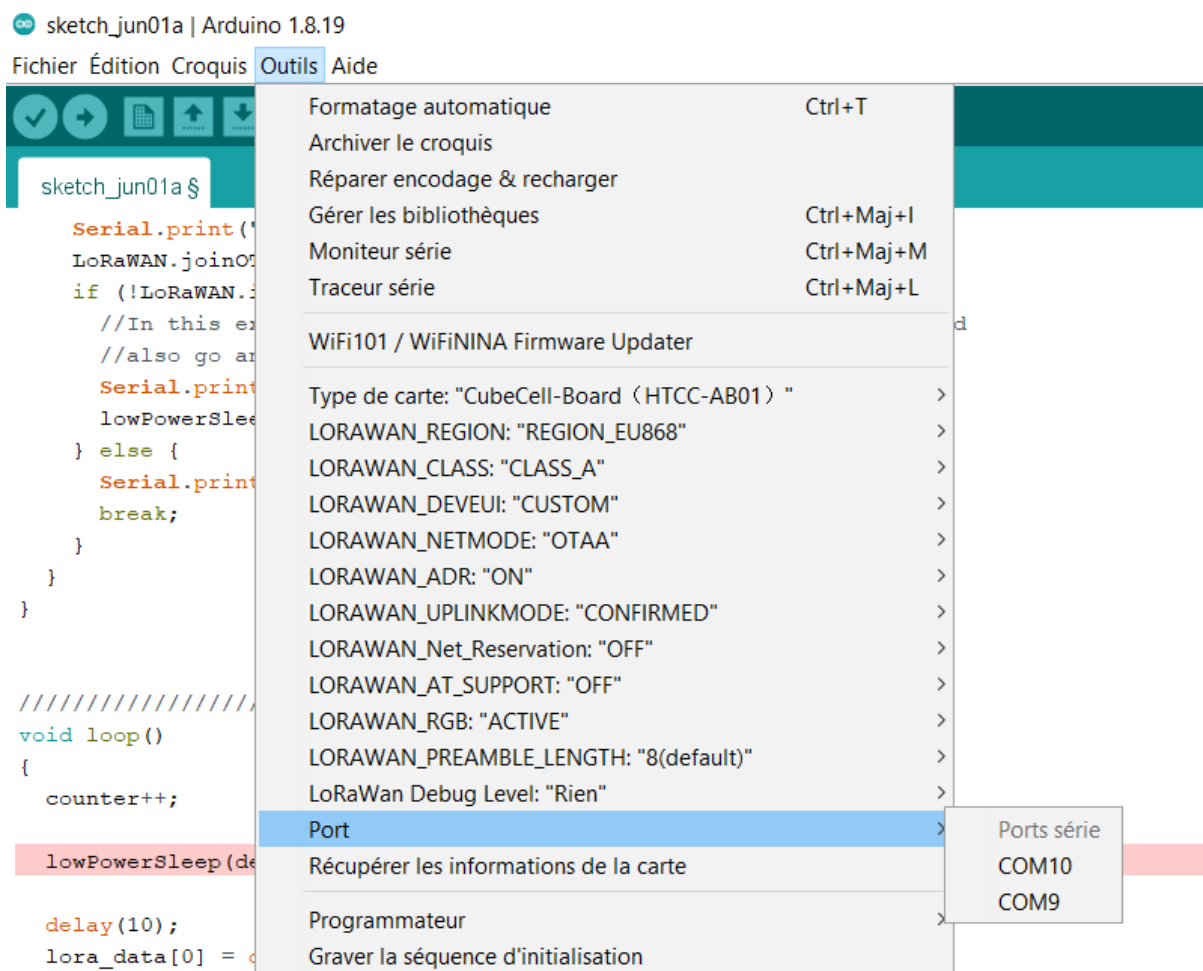


On en profite pour aller dans **outils > LORAWAN_REGION > REGION_EU868**



Ainsi que dans **outils** > **LORAWAN_AT_SUPPORT** > **OFF**

On choisit finalement le port pour envoyer le code dans **outils** > **ports** > **COMxx**



Note : Parfois, il y a plusieurs ports indiqués et on ne sait pas lequel choisir. Il suffit de débrancher, regarder les ports disponibles, puis rebrancher et refaire l'opération. Celui qui apparaît est celui qu'il faut sélectionner.

La carte est prête à être flashée !

4. Envoyer le code sur la carte Cubecell

Le code à envoyer [se trouve ICI](#) ou sur la clé USB distribuée par les animateurs. On le copie et on le colle dans la fenêtre vierge d'Arduino IDE (pensez au raccourci Ctrl+A puis Ctrl+C pour aller plus vite).

ANNEXE F. TUTORIEL DE FABRICATION DU WATAR

Dans les toutes premières lignes, on observe les termes **devEUI**, **appEUI**, **appKey** C'est ici que l'on va devoir coller nos codes d'accès !

```
sketch_jun01a | Arduino 1.8.19
Fichier Édition Croquis Outils Aide

sketch_jun01a $
#include "LoRaWANMinimal_APP.h"
#include "Arduino.h"

//Set these OTAA parameters to match your app/node in TTN
uint8_t devEui[] = { 0x70, 0xB3, 0xD5, 0x7E, 0xD0, 0x04, 0xE7, 0x65 };
uint8_t appEui[] = { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 };
uint8_t appKey[] = { 0xD9, 0x38, 0x64, 0xD4, 0xC5, 0x65, 0x96, 0x89, 0x4E, 0xBE, 0xB0, 0x0E, 0xC1, 0xF6, 0xF6, 0x71 };

uint16_t userChannelsMask[6]={ 0x00FF,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000 };
```

Pour les trouver, direction la page de Things Network que nous avons laissée de côté. Il faut revenir à la page du capteur en question :

eui-70b3d57ed0052f61
ID: eui-70b3d57ed0052f61

↑ n/a ↓ n/a • Last activity 4 days ago

Overview Live data Messaging Location Payload formatters Claiming General settings

General information

End device ID	eui-70b3d57ed0052f61
Frequency plan	Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2 - recommen...
LoRaWAN version	LoRaWAN Specification 1.0.2
Regional Parameters version	RP001 Regional Parameters 1.0.2
Created at	Jul 7, 2022 14:55:27

Activation information

AppEUI	00 00 00 00 00 00 00 00
DevEUI	70 B3 D5 7E D0 05 2F 61
AppKey	.....

Live data See all activity →
Waiting for events from eui-70b3d57ed0052f61...

Location Change location settings →

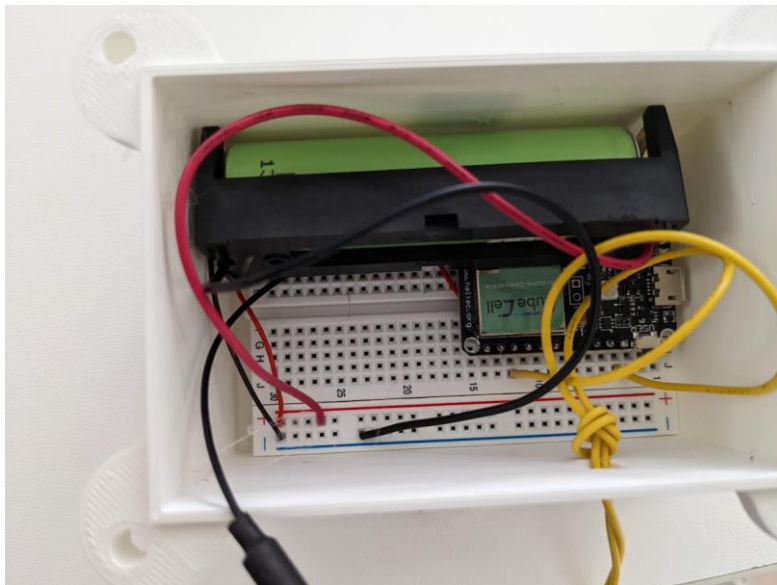
On clique alors sur le “<>” à côté du DevEUI en bas de la page, puis sur : le code est alors copié. Dans Arduino, on sélectionne ensuite le code dans les accolades du **DevEUI** et on colle notre nouveau code.

Pour l'AppKey, la procédure est similaire : il faut d'abord cliquer sur puis sur “<>”, et enfin sur : le code est copié, il faut le coller encore une fois dans les accolades de **AppKey**.

Tout est prêt : c'est parti pour l'envoi ! on clique sur Ctrl + U et on attends 1 ou 2 minutes le temps du flash. Vous pouvez maintenant surveiller la page sur The Things Network et scruter le premier message qui arrive !!

ANNEXE F. TUTORIEL DE FABRICATION DU WATAR

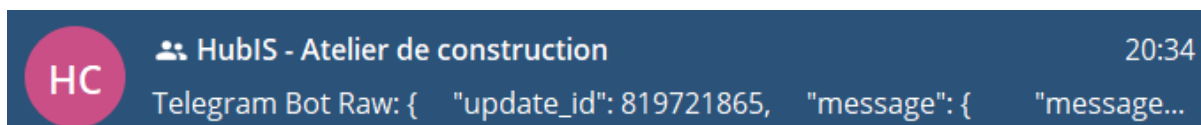
A ce moment-là, le câble USB peut être débranché, la pile peut être insérée, et le capteur peut être mis dans le boîtier (notez le petit nœud du câble jaune pour ne pas l'arracher) :



5. Recevoir les alertes du WatAr sur Telegram

The Things Network permet de voir si un objet connecté envoie ses données, il n'est cependant pas adapté à leur visualisation et ne peut pas envoyer d'alerte. Il faut donc aller sur l'application Telegram de manière à ce que les données arrivent directement en alertes sur le Téléphone (Telegram est [aussi disponible sur ordinateur](#)).

Dans la barre de recherche (en haut), on cherche le groupe ouvert "**HubIS - FabLab du Merle**" :



On envoie alors un message contenant le **DevEUI** du WatAr, ainsi que son nom (et, si besoin, ses coordonnées en X et Y). Laissez-vous guider en envoyant le message **/declare** sur cette conversation !

Voilà, le tutoriel touche à sa fin. A chaque changement d'état du capteur, vous recevrez une notification sur Telegram. Maintenant, à vous de tester le fonctionnement de votre capteur WatAr !

Annexe G

Tutoriel de fabrication du Pilowtech

Ce tutoriel a été réalisé dans le cadre du projet de recherche HubIS.

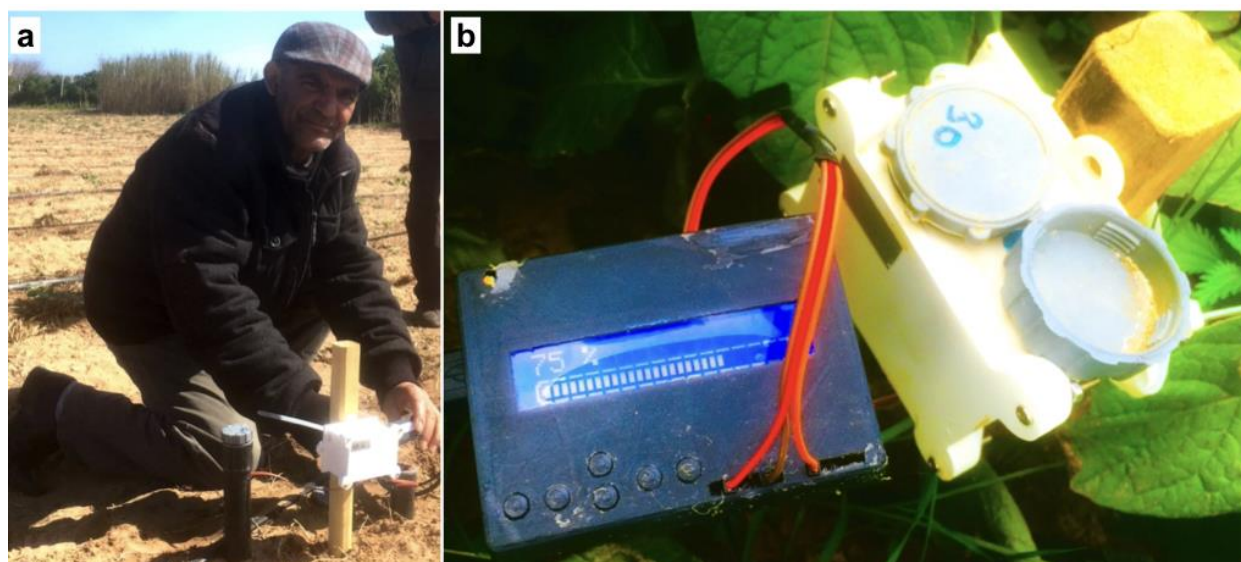
Auteurs : Paul Vandôme, Simon Moinard.



Tutoriel de construction d'un capteur Pilowtech

Préambule

Le Pilowtech est un système à bas coût à construire soi-même, conçu pour le pilotage de l'irrigation par suivi de l'humidité du sol. L'étalonnage du capteur dépend d'un paramètre unique, en fonction du type de sol. Dans ce tutoriel, vous apprendrez à fabriquer un **capteur d'humidité** à double profondeur, **connecté**, à **bas coût** et **facile à réparer**.



Il est nécessaire que la zone soit couverte par un réseau LoRa ([tutoriel disponible ici](#)).

Ce tutoriel est décomposé en plusieurs étapes :

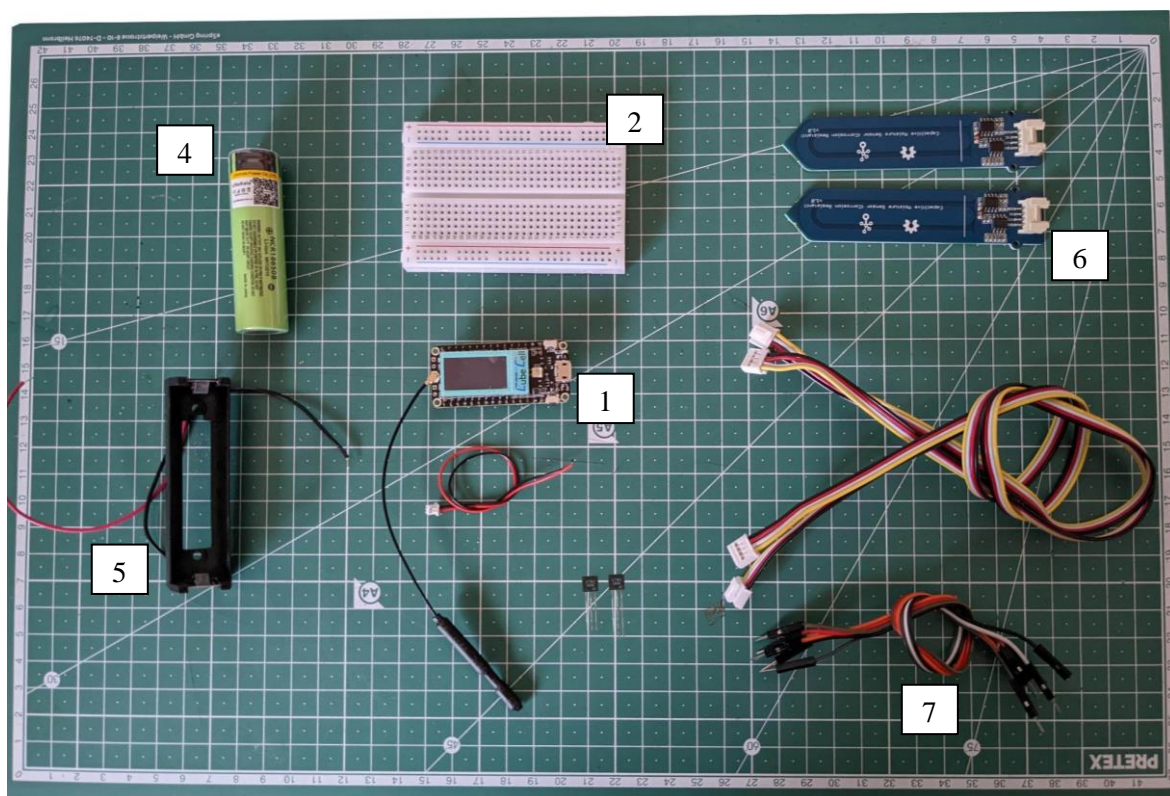
1. Dans un premier temps, nous allons fabriquer le Pilowtech (hardware).
2. Nous allons ensuite déclarer *virtuellement* le Pilowtech sur le serveur internet.
3. On renseigne les codes d'accès au Pilowtech construit pour qu'il puisse envoyer ses données.
4. Les données du Pilowtech sont finalement visualisables sur la plateforme de visualisation en ligne.
5. Il ne nous reste qu'à étalonner le capteur afin de convertir les données brutes digitales en valeurs d'humidité !

Vous serez accompagné dans ce tutoriel par un animateur, n'hésitez pas à lui poser des questions !

1. Design du Pilowtech

Pour construire le Pilowtech, vous aurez besoin des composants suivants :

1. Une carte [Cubecell HTCAB02 868-915MHz](#) (50 TND)
2. Une [petite breadboard](#) (3 TND)
3. Un [câble USB - micro USB](#) DATA (3 TND)
4. Une [pile LiPo 18650](#) (3 TND)
5. Un [support de pile LiPo](#) (2 TND)
6. Une ou deux [sondes capacitives](#) d'humidité (3 TND)
7. Des [câbles dupont](#) Mâle-Mâle (3 TND)



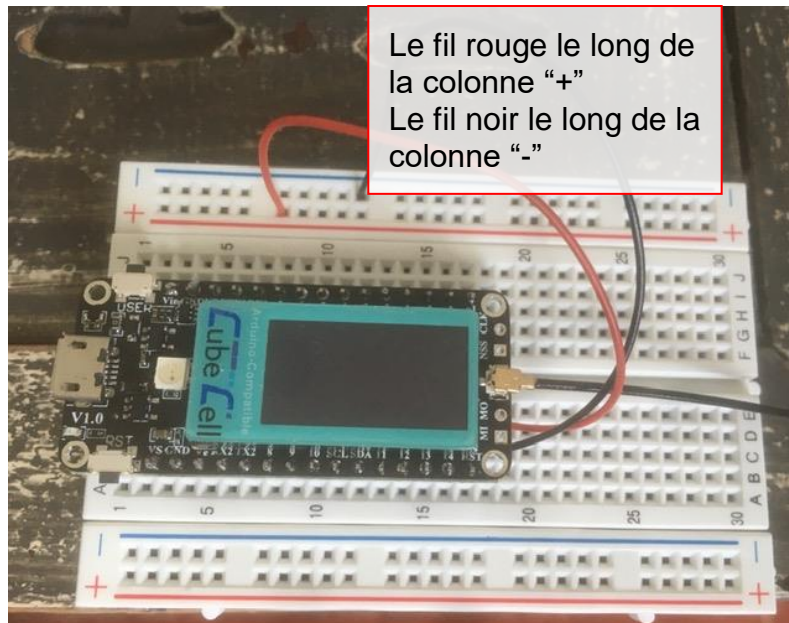
1.1. Le microcontrôleur

On commence par sortir la carte Cubecell de sa boîte. C'est un microcontrôleur : c'est elle qui va permettre une fois programmée de récupérer les valeurs produites par les sondes capacitives et de les envoyer toutes les 3 minutes.

La carte est déjà soudée. Brancher la mini antenne sur la CubeCell. C'est grâce à elle que le capteur pourra se connecter au réseau LoRa.

1.2. La breadboard

La breadboard est une planche trouée qui fait office de multiprise : les trous sur une même ligne sont reliés entre eux, ce qui permet au courant de circuler entre les composants.

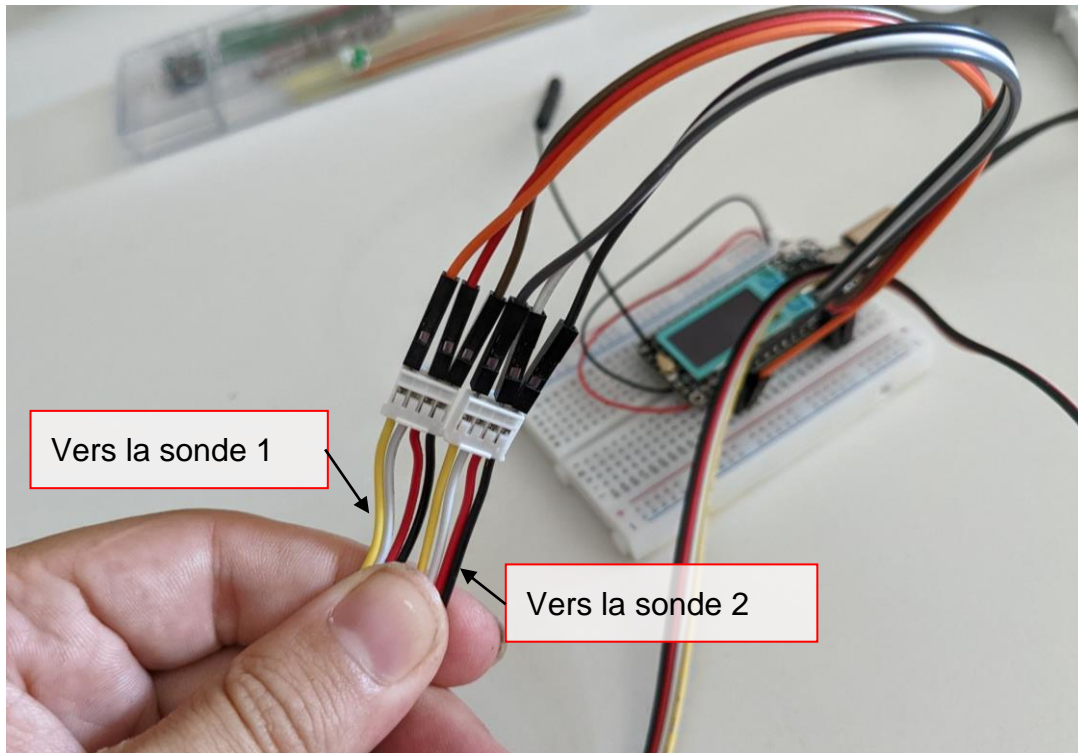


- Clipser la cubecell sur la breadboard, en veillant à ce que le port USB ne dépasse pas de la breadboard (vous pouvez la positionner de manière à utiliser les trous h5-h19 de la breadboard)
- Brancher le câble rouge de la cubecell sur la colonne rouge (+) de la breadboard, et le câble noir sur la colonne bleue (-).

NB : pour une meilleure autonomie (une saison de culture entière), il est préférable d'ajouter un transistor au circuit électronique. Il servira à couper l'alimentation aux capteurs lorsque le PilowTech sera en mode veille.

1.3. Les sondes

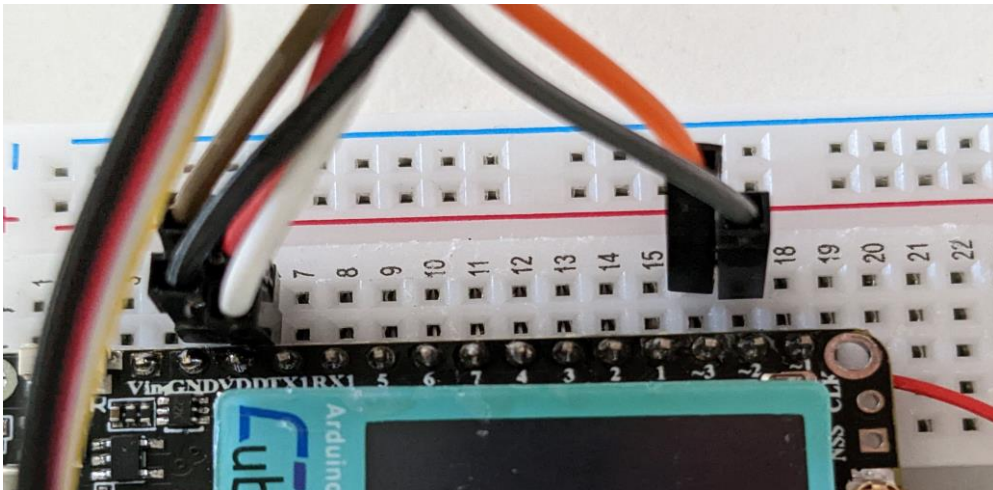
Les sondes capacitives possèdent 3 sorties "femelles" : pour relier ces sondes à la carte Cubecell il faut brancher des câbles "Mâle-Mâle".



- Le fil noir de la sonde est le GND ou la masse. Ici, il est prolongé vers le microcontrôleur par les câbles noir et marron.
- Le fil rouge de la sonde est le VDD, ou le "+". Ici, il est prolongé par les câbles blanc et rouge.
- Le fil jaune SIG est la valeur analogique lue par la sonde. Il est prolongé par les câbles orange et gris.
- Si un fil blanc arrive de la sonde, le laisser libre.

Reliez les câbles « male-male » aux câbles de vos sondes.

On termine l'installation par le branchement des sondes à la breadboard :

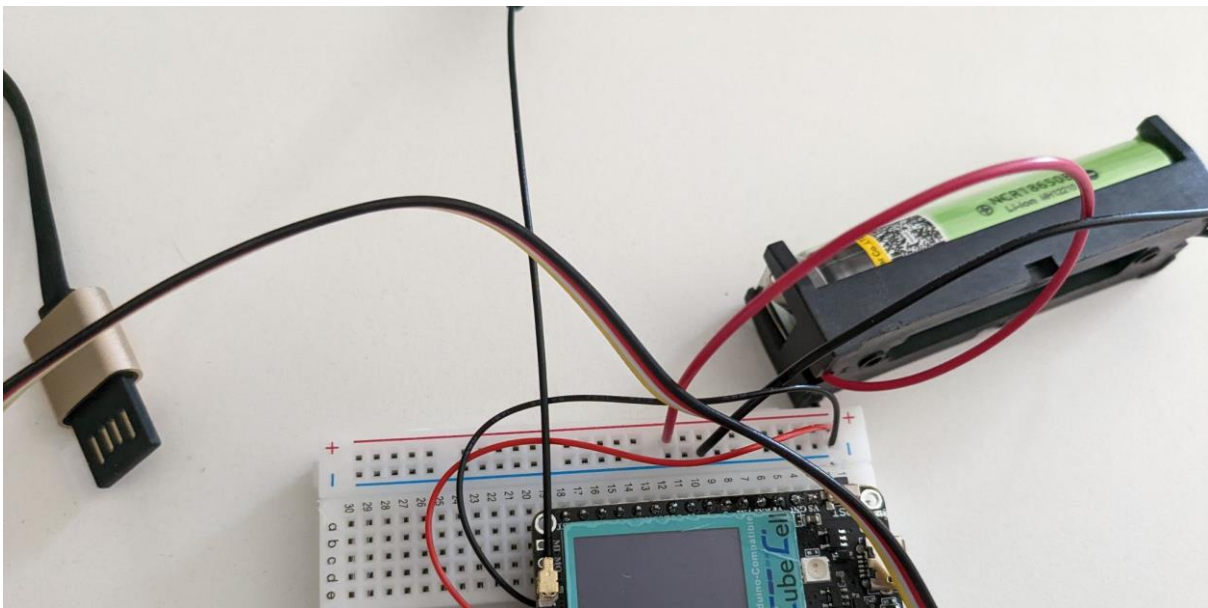


- Brancher le câble GND (câble noir de la sonde) dans le trou sur la ligne GND de la cubecell (sur la photo le câble noir).
- Brancher le câble VDD (câble rouge de la sonde) dans le trou sur la ligne VDD de la cubecell (sur la photo câble blanc)
- Brancher le câble SIG (câble jaune de la sonde) dans le trou sur la ligne ~2 (câble gris sur la photo)
- Répéter la même opération avec la deuxième sonde, sur la colonne suivante (câbles marron et rouge sur la photo) sauf le câble SIG qui se place en face de la sortie ~3 (câble orange sur la photo).

1.4. Alimentation

L'alimentation du capteur est assurée par une batterie LiPo rechargeable.

- Brancher le support de pile (attention : ne placez pas la pile dans son support pour le moment) le câble rouge sur la colonne rouge (+) de la breadboard, et le câble noir sur la colonne bleue (-) de la breadboard.
- **Une fois que cette étape est terminée, appelez l'animateur pour vérifier le montage.**
- Une fois le montage validé, vous pouvez insérer la pile dans son support, en vérifiant bien la polarité (le + avec le + et le – avec le -)



- Vous pouvez maintenant placer le capteur dans son boîtier, et appeler l'animateur.
- Une fois l'identification du capteur faite, vous pouvez visualiser vos données !

2. La déclaration du Pilowtech

Pour que le Pilowtech puisse devenir un objet connecté, nous devons lui attribuer une identité numérique. Nous allons donc le déclarer “*virtuellement*” sur internet.

Rendez-vous sur le site [The Things Network](https://www.thingsnetwork.io/). C'est ce serveur gratuit qui va permettre de déclarer le capteur, et de faire transiter ses données sur internet.

Si c'est votre première visite, il faut créer un compte et le valider via son adresse mail.

La première page nous indique si l'on veut aller dans les applications (les flottes de capteurs) ou les gateways (les passerelles/antennes). Allons voir les applications.

Dans le cadre de ce tutoriel vous allez utiliser une application déjà existante : tournez-vous vers un animateur pour vous donner accès à l'application **formation-hubis**.

La page d'accueil contient des onglets à gauche :

- Les **End devices** : c'est ici que l'on déclare et consulte les capteurs. Il y a un aperçu de cette page en bas de la page d'accueil.
- **Live data** : on peut voir ici toutes les données remonter. Il y a aussi un aperçu à droite de la page d'accueil.
- **Le reste** n'est pas nécessaire dans le cadre de ce tuto !

Les capteurs utilisés ont déjà été déclarés sous la forme « formation-hubis-x ». Identifiez le numéro de votre capteur (indiqué sur la boîte Cubecell), et cliquez sur le numéro correspondant dans la liste des end-devices de l'application.

La partie qui nous intéresse s'intitule « Activation information » :

Activation information

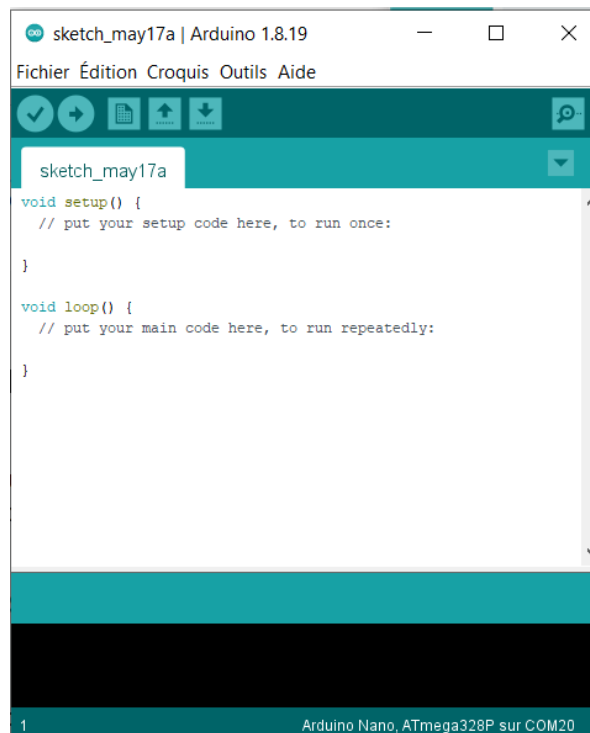
AppEUI	00 00 00 00 00 00 00 00	<>
DevEUI	70 B3 D5 7E D0 05 2F 61	<>
AppKey	.....

3. Installation et paramétrage Arduino

Arduino IDE est un logiciel gratuit qui va nous permettre de programmer le microcontrôleur. Il faut au préalable installer le [logiciel Arduino](#) sur son ordinateur. Pour les SE Apple, [c'est ici](#) ! Le liste des versions disponibles [ici](#).

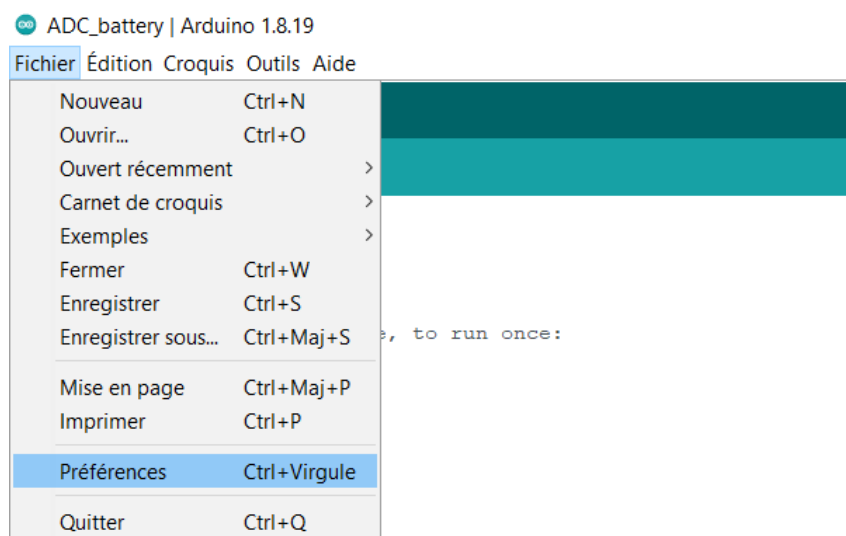
L'installation demandera quelques autorisations, qu'il faudra accepter.

Une fois installé, on lance le logiciel Arduino. La fenêtre de programmation s'ouvre :



Copier-coller ici le code de programmation du Pilowtech fourni par l'animateur.

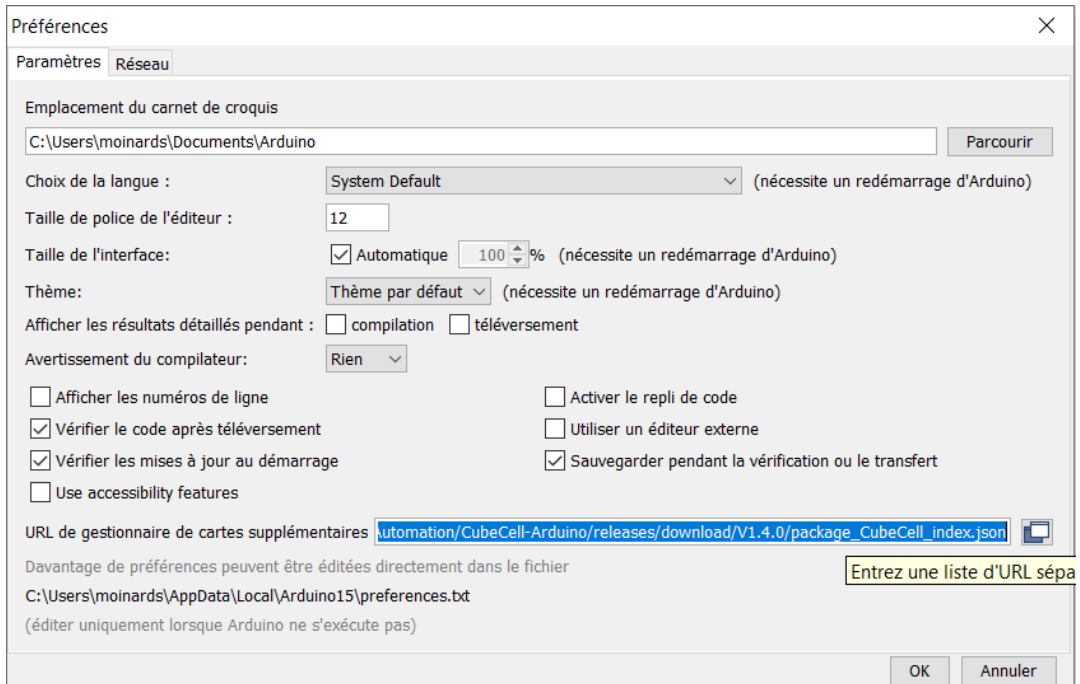
Nous devons préciser que notre carte est une Cubecell. Pour cela, on va dans **Fichier>Préférences**



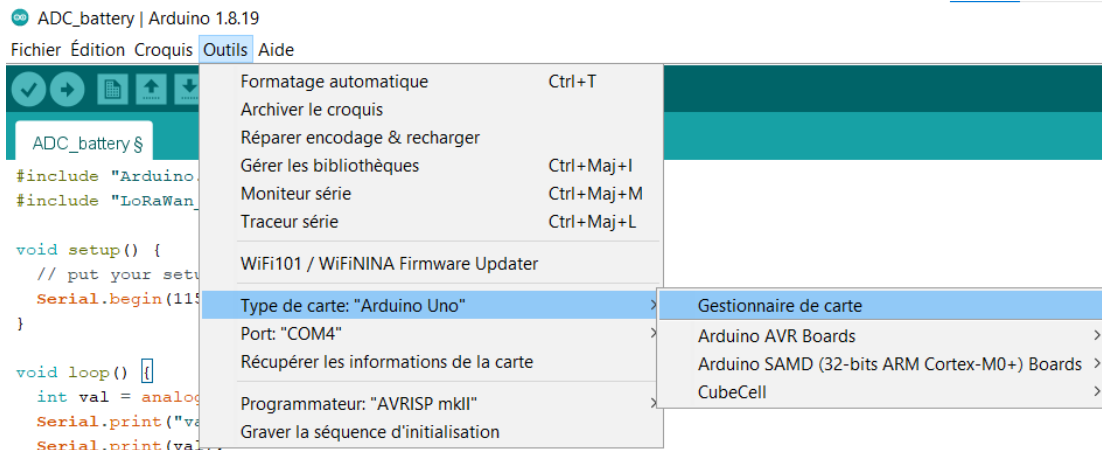
Dans la nouvelle fenêtre, on cherche **URL de gestionnaire de cartes supplémentaires** et on y colle le texte suivant :

https://github.com/HeITecAutomation/CubeCell-Arduino/releases/download/V1.4.0/package_CubeCell_index.json

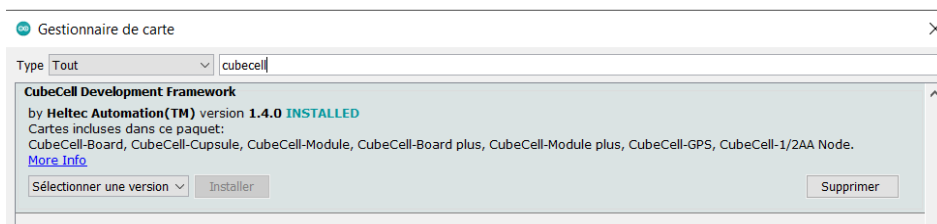
puis cliquer sur OK



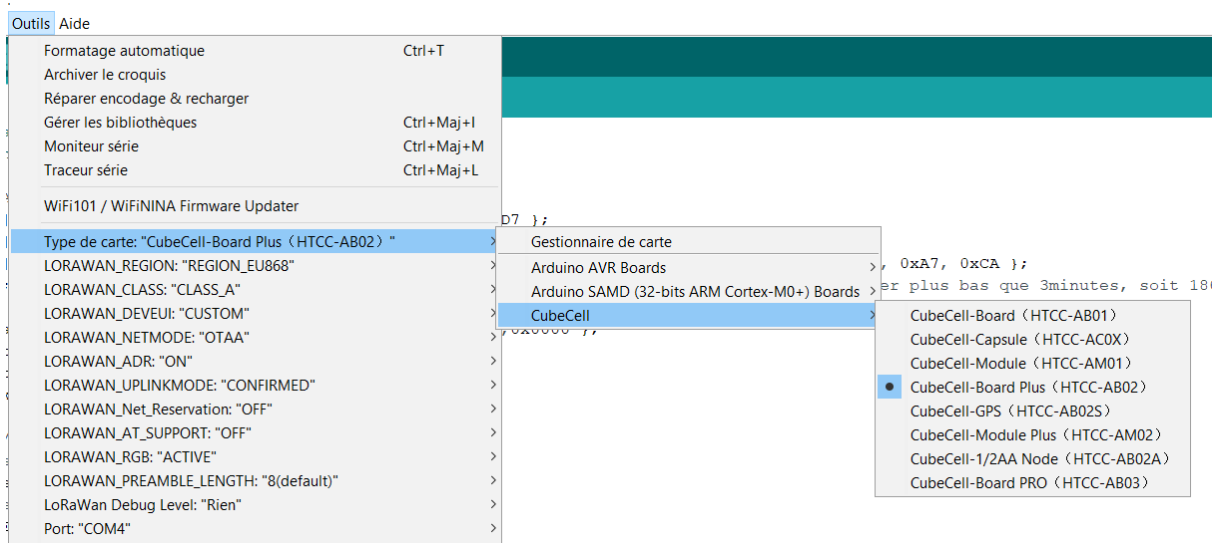
Ouvrir maintenant **Outils > Type de cartes > Gestionnaire de Cartes**



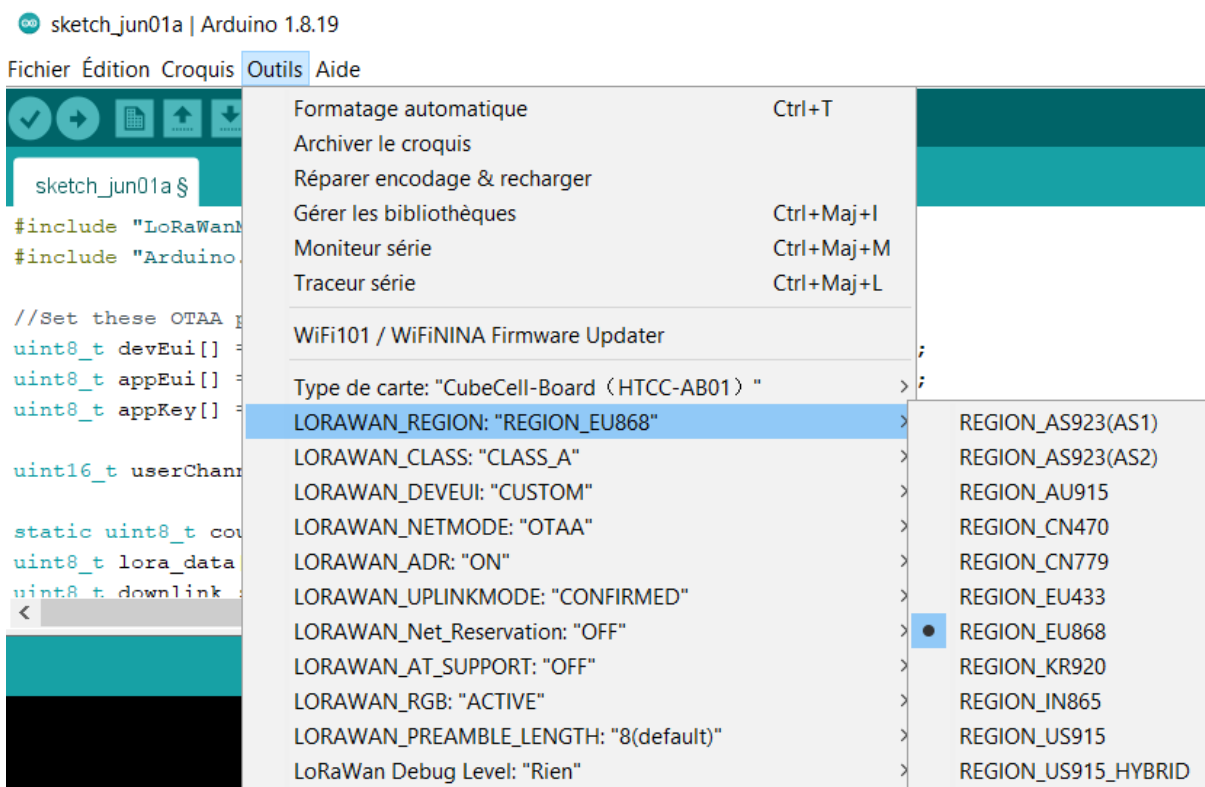
On recherche depuis la barre de recherche « **Cubecell** ». Installer la librairie **CubeCell Development Framework**. L'installation peut prendre quelques minutes.



On sélectionne la carte utilisée dans **outils > Type de Carte > CubeCell > CubeCell-Board Plus (HTCC-AB02)** :



On en profite pour aller dans **outils > LORAWAN_REGION > REGION_EU868**

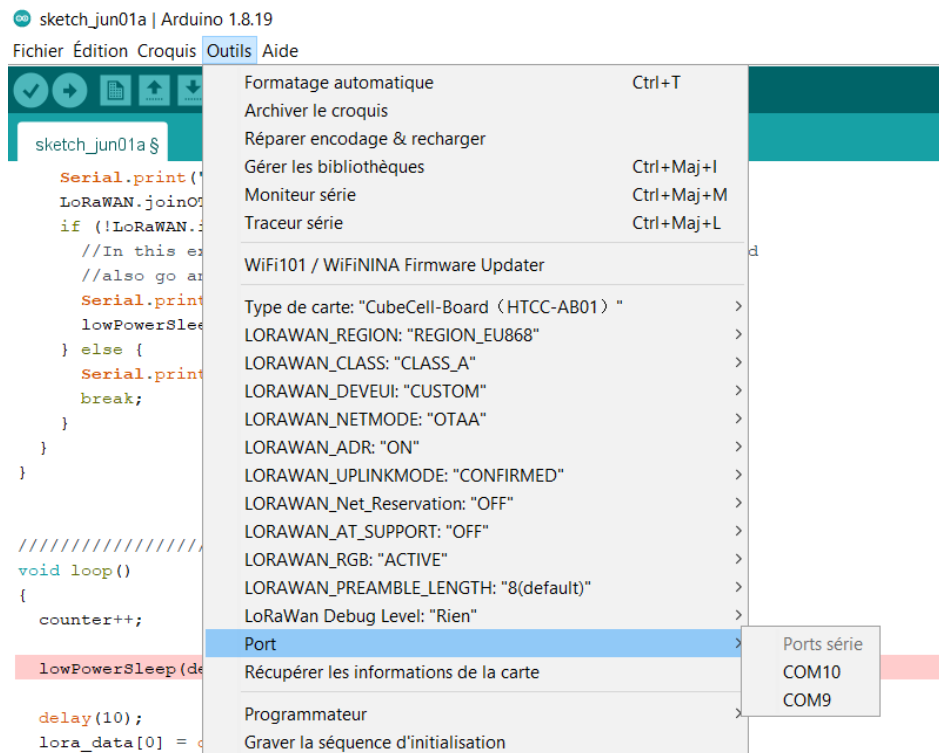


On désactive quelques options pour économiser la batterie :

- **outils > LORAWAN_AT_SUPPORT > OFF**
- **outils > LORAWAN_RGB > DEACTIVE**

On branche la carte CubeCell à l'ordinateur avec le câble USB, puis on choisit finalement le port pour envoyer le code dans **outils > ports > COMxx** (xx étant un nombre qui dépend de votre ordinateur).

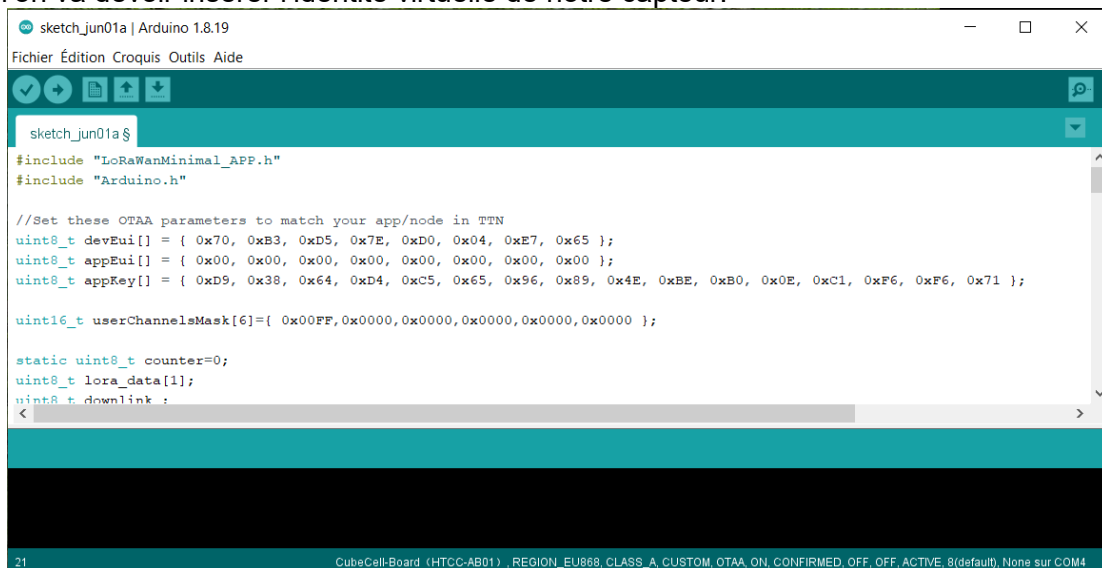
Note : Parfois, il y a plusieurs ports indiqués et on ne sait pas lequel choisir. Il suffit de débrancher, regarder les ports disponibles, puis rebrancher et refaire l'opération. Celui qui apparaît est celui qu'il faut sélectionner.



La carte est prête à être flashée !




Flasher la carte Cubecell

Dans les toutes premières lignes du programme, on note les mots **devEUI**, **appEUI**, **appKey** C'est ici que l'on va devoir insérer l'identité virtuelle de notre capteur.



Pour les trouver, direction la page de Things Network que nous avons laissée de côté. Dans la partie « Activation information » de notre capteur (vérifier le numéro) :

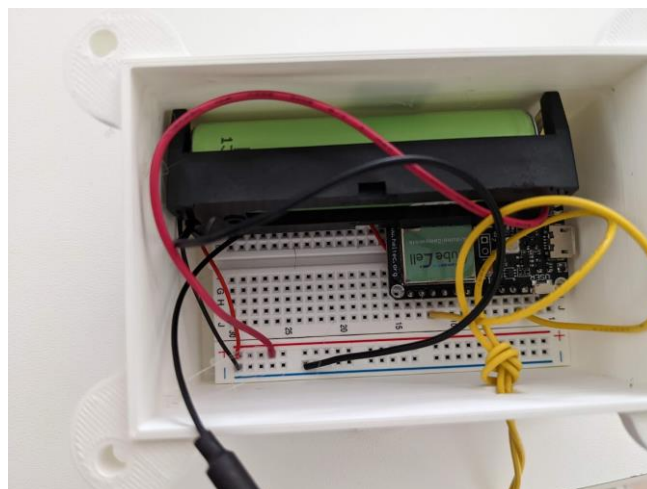
The screenshot shows the TTN console for a device with ID **eui-70b3d57ed0052f61**. The interface includes tabs for Overview, Live data, Messaging, Location, Payload formatters, Claiming, and General settings. The 'General information' section lists: End device ID (eui-70b3d57ed0052f61), Frequency plan (Europe 863-870 MHz), LoRaWAN version (LoRaWAN Specification 1.0.2), Regional Parameters version (RP001 Regional Parameters 1.0.2), and Created at (Jul 7, 2022 14:55:27). The 'Activation information' section shows AppEUI (00 00 00 00 00 00 00 00), DevEUI (70 B3 D5 7E 00 05 2F 61), and AppKey (a series of dots). The 'Live data' section shows 'Waiting for events from eui-70b3d57ed0052f61...'. The 'Location' section shows a map of Europe with the text 'Change location settings --'.

- Cliquer sur “<>” à côté du DevEUI, puis sur  : le code est alors copié. Dans Arduino, on sélectionne ensuite le code dans les accolades du **DevEUI** et on colle notre nouvel identifiant.
- Pour l’AppKey, la procédure est similaire : il faut d’abord cliquer sur  puis sur “<>”, et enfin sur  : le code est copié, il faut le coller encore une fois dans Arduino entre les accolades de **AppKey**.

Tout est prêt : c’est parti pour l’envoi ! On clique sur « Téléverser » et on attend 1 ou 2 minutes le temps du flash. La fenêtre indique en bas en orange l’état d’avancement. Vous pouvez maintenant vérifier la page sur The Things Network et attendre le premier message de votre capteur.

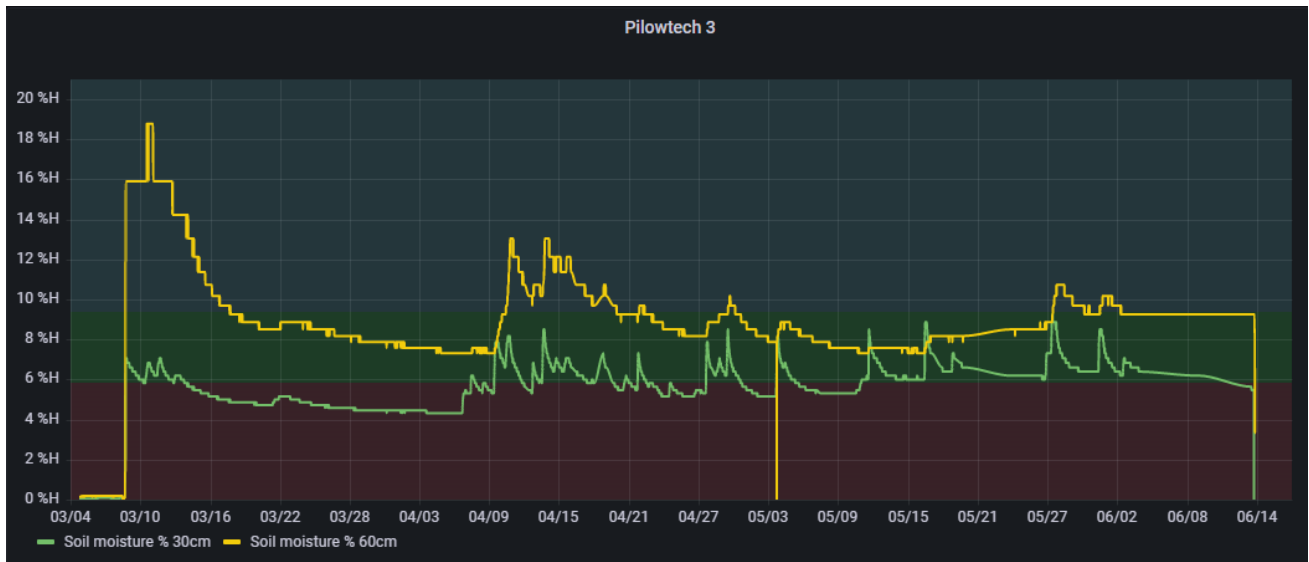
Validez cette étape auprès de l’animateur.

Le câble USB peut être débranché, la pile peut être insérée (attention à la polarité), et le Pilowtech peut être installé dans son boîtier 3D.



4. Visualiser les données du Pilowtech

Les données sont visualisables en temps réel sur la plateforme en ligne Grafana.



Nous allons maintenant étalonner le capteur, c'est-à-dire déterminer les paramètres qui sont propres à la sonde et au type de sol étudié.

- Laissez vos capteurs dans l'air : nous allons pouvoir déterminer le paramètre ϵ_a
- Plongez vos capteurs dans l'eau (attention à ne pas dépasser le trait, l'électronique doit rester sèche) : nous allons pouvoir déterminer le paramètre ϵ_w
- En fonction du type de sol, nous allons déterminer le paramètre k

Félicitations ! Vous venez de construire un capteur d'humidité du sol connecté à bas coût !

N'hésitez pas à poser des questions à l'animateur si besoin, merci de votre participation.

Pour tout besoin d'informations complémentaires :

paul.vandome@supagro.fr

simon.moinard@supagro.fr

Annexe H

Atelier de construction d'un capteur d'humidité low-tech, forum pour l'agroécologie ANzAR 2023.

Cet atelier a été réalisé dans le cadre du projet de recherche HubIS et du projet ANzAR.

L'atelier s'est tenu le 09/03/2023 en périphérie de Tunis, dans le cadre du forum ANzAR, forum multi-acteurs pour l'agroécologie en Afrique du nord.

Forum ANzAR

Atelier : Le Pilowtech, un capteur à bas coût pour le pilotage de l'irrigation

Date : 09/03/2023, 12h00-13h00

Résumé

Tous les agriculteurs se sont un jour posé ces questions : Quel jour arroser mes cultures ? Et combien de temps ? La réponse est loin d'être évidente. Le calendrier d'irrigation dépend du climat, du type de culture, des propriétés du sol, du système d'irrigation... De nombreux équipements de mesure d'humidité du sol (tensiomètres, sondes TDR...) existent déjà sur le marché. Pour autant, ils restent peu utilisés en agriculture, car souvent trop chers, trop techniques ou mal adaptés aux conditions locales. Dans cet atelier vous sera présenté le Pilowtech, un capteur d'humidité à bas coût, facile à fabriquer et à utiliser. Nous discuterons de son fonctionnement et testerons ensemble la réaction du capteur en conditions d'irrigation.

Modalités

Animation : P.Vandôme et Y.Bensouiah

Nombre de participants : 10 personnes

Durée : 1h

Matériel

5 Pilowtechs hardware (fr)

4 onsite-reader (fr)

1 gateway mobile + connexion wifi (airbox) (fr)

3kg de sable (tn)

3 seringues plastique 100mL (ou équivalent) (tn)

5 pots en verre transparents (tn)

Vidéoprojecteur et connectique HDMI (ou wifi) (tn)

Grande table ou 5 petites tables (tn)

Fiche d'évaluation

Le sujet de l'atelier était-il nouveau pour vous ?

Avez-vous trouvé cet atelier utile ?

Quelle est l'idée clé que vous avez retenue ?

Allez-vous essayer d'en savoir plus sur ce sujet ?

Allez-vous essayer d'appliquer cette méthode chez vous ? Ou en parler à des amis/collègues ?

Si oui, comment/à qui ? Si non, pourquoi ?

De quoi auriez-vous besoin pour aller plus loin (tutoriels vidéo ou sur internet, conseil à distance, formation, conseil sur place...) ?

Déroulé de l'atelier :

Préalable :

Préparer 5 capteurs Pilowtech avec display grafana valeur brute

Assurer connexion réseau LoRa

Afficher sur vidéoprojecteur ppt + grafana

Préparer une feuille blanche par plan de travail avec noté : Capteur numéro x ; $e_a=$; $e_w=$; $k=$;

Les plans de travail sont placés face au vidéoprojecteur. Sur chaque plan de travail : 1 pot de sol, 1 capteur numéroté, 1 feuille paramètres

Atelier :

10' présentation du système (origine et utilité, fonctionnement, calibration, objectifs de la session)

5' Explication des consignes et répartition des participants (environ 2 par plan de travail)

5' : on place la sonde dans l'air pour les 5 capteurs > détermination de e_a

5' : on place la sonde dans l'eau pour les 5 capteurs > détermination de e_w

10' : on place la sonde dans le sol pour les 5 capteurs > estimation de k

10' : on ajoute de l'eau progressivement et on suit l'évolution de l'humidité

Pendant ce temps : présentation du lecteur onsite et suivi évolution avec lecteur onsite (optionnel, si on a le temps)

10' : conclusion et fiche d'évaluation

Marge de manœuvre : 5'.

Abstract

The sustainability of irrigated agriculture is threatened by growing pressure on water resources, whose over-exploitation is leading to the degradation of ecosystems, especially in the Mediterranean basin. Despite investment in costly modern equipment, the performance of irrigation systems remains below expectations, notably due to induced effects on a wider scale. Digital information technologies offer new opportunities for better understanding and management of water resources, but they remain relatively inaccessible and poorly adapted to agrarian contexts, particularly for surface irrigation systems and in the global South. Therefore, to what extent can the participatory design of digital information technologies result in new tools that are useful and accessible to improve the performance of irrigation systems and contribute to greater territorial sustainability? The results of our PhD thesis show that digital innovation for irrigation management does not necessarily have to be complex, expensive and energy-intensive. We developed new simple, open source, do-it-yourself and low-cost measurement and automation systems to support real-time water management with farmers practising surface irrigation in France and drip irrigation in Tunisia. We proposed a multi-criteria and multi-scale modeling method to simulate the effects of the adoption of such new tools on the performance of irrigation systems. Our results put into perspective the benefits of changes in practices resulting from the adoption of innovations, and illustrate the trade-offs emerging on a larger scale. We believe that this work will contribute to the democratisation of digital low-tech for more autonomous, energy and water-saving irrigation systems. The designed tools and methods are highly reproducible and open the way to future research on the understanding and management of water flows in various agro-hydrological contexts.

Key words : Agricultural water management ; Precision irrigation ; Digital farming ; Participatory design ; Agro-hydrological modeling ; Low-tech water sensors ; Internet of Things (IoT).

Résumé

La durabilité de l'agriculture irriguée est menacée par une tension croissante sur la ressource en eau, dont la surexploitation conduit à une dégradation des écosystèmes, en particulier dans le bassin méditerranéen. En dépit d'investissements dans des équipements modernes coûteux, les performances des systèmes irrigués demeurent en dessous des attentes, notamment en raison d'effets induits à plus large échelle. Les technologies numériques de l'information offrent de nouvelles opportunités pour mieux comprendre et mieux gérer la ressource en eau, mais elles restent peu accessibles et peu adaptées aux contextes agraires, en particulier pour les systèmes irrigués gravitaires et dans le Sud global. Dès lors, dans quelle mesure le développement participatif de technologies numériques pour l'information peut-il aboutir à de nouveaux outils utiles et accessibles pour améliorer les performances des systèmes irrigués et contribuer à une meilleure durabilité des territoires? Les résultats de nos travaux de thèse montrent que l'innovation numérique pour la gestion de l'irrigation n'a pas nécessairement besoin d'être complexe, onéreuse et intensive en énergie. Nous avons développé de nouveaux systèmes de mesure en temps réel et d'automatisation simples, *open source*, auto-constructibles et à bas coût pour accompagner la gestion de l'eau avec des agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire en France et l'irrigation localisée en Tunisie. Nous avons proposé une méthode de modélisation multi-critère et multi-échelle pour simuler les effets de l'adoption de ces nouveaux outils sur les performances des systèmes irrigués. Nos résultats mettent en perspective les bénéfices des changements de pratiques liés à l'adoption des innovations, et illustrent les compromis émergeant à plus large échelle. Nous estimons que ces travaux contribueront à la démocratisation des *low-tech* numériques pour des systèmes irrigués plus autonomes et plus économes. Les outils et méthodes proposés sont hautement reproductibles et ouvrent la voie à de futures recherches pour la compréhension et la gestion des flux d'eau dans des contextes agro-hydrologiques variés.

Mots clés : Gestion de l'eau agricole ; Irrigation de précision ; Agriculture numérique ; Innovation participative ; Modélisation agro-hydrologique ; Capteurs hydrologiques *low-tech* ; Internet des objets.