

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL HARRACH - ALGER
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة – الحراش- الجزائر



Thèse de Doctorat

Présentée pour l'obtention de Doctorat d'état en Sciences agronomiques

Thème :

Analyse de la performance des systèmes irrigués au Ziban, cas du goutte à goutte dans la plasticulture dans la commune d'El Ghrous, Biskra

Conception d'une démarche d'analyse et d'amélioration participative des performances de la fertigation en goutte à goutte

Présentée par M. LAIB Khalil

Soutenue le 22 Octobre 2019

Devant le Jury composé de:

M. CHABACA Mohamed Nacer	Professeur, ENSA Alger	Président
M. HARTANI Tarik	Professeur, CU Tipaza	Directeur de thèse
M. BOUARFA Sami	Professeur, Irstea Montpellier	Co-directeur de thèse
M. REGUIEG Lies	Professeur, ENSA Alger	Examineur
M. HAMMANI Ali	Professeur, IAV H II Rabat	Examineur
M. KUPER Marcel	Professeur, Cirad Montpellier	Examineur

2019/2020

Remerciement

Ce travail de recherche a été effectué dans le cadre du projet ANR Groundwater ARENA, au sein de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique ENSA Alger (Algérie), du Centre nationale de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA) Biskra (Algérie), du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) et de l'UMR Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages (G-EAU) à Montpellier (France).

Mes premiers remerciements s'adressent à mon directeur de thèse Professeur Tarik pour toutes ses orientations, son soutien et ses directives qu'il m'a apportés tout au long des années de travail sur la thèse.

Mes sincères remerciements vont également à Sami Bouarfa, qui a bien assuré le bon déroulement de mon travail de près et même de loin, et qui m'a accueilli au sein de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, Montpellier (France) durant les divers séjours scientifiques.

Mes profonds remerciements s'adresseront également à Marcel Kuper que pour le soutien moral, scientifique qu'a apporté le long des années de mon inscription en thèse.

Je remercie également aux membres de jury de cette thèse, Mohamed Nacer Chabaca, Lies Reguieg, Marcel Kuper et Ali Hammani pour le temps consacré à la lecture et l'évaluation de ce travail.

Je voudrais aussi remercier les différentes institutions de recherche, le CIRAD qui a pris en charge mes séjours scientifiques, l'UMR G-EAU/ IRSTEA qui m'a permis d'enrichir mon expérience scientifique à travers différents échanges et rencontres. Un grand merci à Jean-Claude Mailhol qui a contribué activement à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens également à remercier l'équipe Lisode pour leur accueil et contributions et en particulier Amar Imache qui a également participé ce travail avec sa touche particulière.

Ma reconnaissance s'adresse également à tous ceux qui m'ont aidée au sein de mon terrain, tous les agriculteurs d'El Ghrous avec qui j'ai travaillé tout au long des années de terrain, et à Youcef Mezghich en particulier.

Je tiens finalement à remercier ma famille qui m'a toujours soutenu. Merci à mes parents pour leur patience et encouragement. Merci à mes sœurs et à mon frère pour leur soutien permanent. Je remercie aussi ma chère épouse pour son soutien quotidien.

Enfin, je suis redevable à toute personne ayant contribué de près ou de loin au bon déroulement et à l'aboutissement de cette recherche.

Sommaire

Liste des figures	7
Liste des tableaux	9
Laboratoires où la thèse a été préparée :	10
1. Chapitre1 : Introduction générale.....	12
1.1 <i>Le maraichage sous serre irrigué au goutte à goutte dans la région de Biskra</i>	12
1.2 <i>Transformations des systèmes agraires dans les Ziban</i>	13
1.2.1 La dynamique du maraichage sous serre associé au goutte à goutte à El Ghrous ...	15
1.2.2 Le goutte à goutte associé au maraichage sous serre à El Ghrous.....	16
1.2.3 L'expertise d'usage ou le savoir faire local associé au modèle local de goutte à goutte sous serre.....	19
1.3 <i>Performances de la technique d'irrigation au goutte à goutte : la confrontation au réel.</i>	20
1.4 <i>L'importance des pratiques</i>	22
1.4.1 Faire parler l'agriculteur sur ses pratiques	22
1.4.2 La modélisation pour objectiver scientifiquement les performances.....	23
1.4.3 L'interactivité, élément central dans une perspective d'amélioration des pratiques	24
1.5 <i>Objectifs de la thèse</i>	25
1.6 <i>Méthodologie</i>	26
1.6.1 Co-analyse des pratiques avec les agriculteurs	26
1.6.2 Analyse des effets des pratiques par la modélisation sur le plan hydraulique et agronomique	26
1.6.3 Conception et la mise en œuvre d'une approche participative pour débattre et améliorer les pratiques de fertigation.....	27
1.7 <i>Organisation de la thèse</i>	27
Chapitre 2. Evaluation de la conduite d'irrigation des agriculteurs, influence de l'accès aux facteurs de production sur les pratiques (Biskra, Algérie)	31
2.1 <i>Introduction</i>	32
2.2 <i>Material and methods</i>	33
2.2.1 Saharan greenhouse farming.....	33
2.2.2 Irrigation practices	35
2.2.3 Application of the AquaCrop model.....	37
2.2.4 Performance indicators	38
a. Distribution uniformity	38
b. Relative water supply.....	39

c. Water stress level	39
2.3. Results.....	40
2.3.1 Distribution uniformity	40
2.3.2 Relative water supply.....	42
2.3.3 Water stress level	45
2.3.4 Explaining farmers' irrigation practices through the variability of drip irrigation performance over the cropping season.....	46
2.4 Discussion.....	48
2.5 Conclusion.....	50
Chapitre 3 : Analyse des pratiques de fertigation au moyen du modèle Pilote-N pour expliquer les pertes de rendement dues aux stress liés à l'eau et l'azote.	52
3.1 Introduction	52
3.2 Méthodologie.....	54
3.2.1 Présentation de l'échantillon.....	54
3.2.2 suivi des pratiques de fertigation, implication des agriculteurs.....	54
3.2.3 Evaluation de la conduite de fertigation au moyen du modèle PILOTE-N, résultat du calage du modèle PILOTE-N.....	55
a. Indice de surface foliaire (LAI).....	55
b. Comparaison des résultats des simulations des rendements par le modèle Pilote avec les rendements observés.....	56
3.2.4 Indicateurs de performance.....	58
3.2.4.1 Indicateurs de performance agronomique : lier les pertes de rendements à des stress abiotiques	58
a. Définition des indicateurs de stress hydrique et de stress azoté.....	58
3.2.4.2 Optimisation des pratiques de fertigation par diminution des pertes d'eau et d'azote.....	59
3.3 Résultats.....	59
3.3.1 Utilisation, de l'eau et de l'azote par la tomate sous serre, résultat comparatif entre les agriculteurs	59
3.3.2 La modélisation pour analyser les impacts des stress hydriques et azotés	62
3.3.3 Identification du type de stress abiotique.....	63
a. Prédominance du stress en eau.....	64
b. Prédominance du stress azoté	64
c. Pas de stress enregistré.....	65
3.3.4 L'impact des pratiques de fertigation sur le rendement.....	66

a. Une sur-irrigation susceptible d’engendrer un stress en azote.....	67
b. Une sur-fertilisation dans objectif d’augmenter le rendement.....	67
3.3.5 Quantification des pertes d’eau et d’azote qui résultent des pratiques de fertigation des agriculteurs	67
3.4 Conclusion.....	68
Chapitre 4 : Une démarche participative expérimentale pour améliorer les pratiques de fertigation des agriculteurs	71
4.1 Introduction	71
4.2 Méthodologie.....	74
4.2.1 Première étape, la réflexion et la conception	76
4.2.2 Deuxième étape, le test de la démarche et le déroulement des simulations.....	80
4.2.3 Troisième étape, la mise en œuvre de l’approche participative.....	81
4.3 Résultats.....	85
4.3.1 Synthèse des résultats des ateliers de simulation participative effectués chez les agriculteurs.....	85
4.3.2 Mobilisation des indicateurs de stress pour qualifier les pratiques de fertigation ...	86
4.3.3 Effet des apprentissages sur l’évolution des pratiques de fertigation des agriculteurs	88
4.3.4 Analyse qualitative des es pratiques des agriculteurs et effets sur les rendements, le premier tour de l’atelier.....	89
4.3.5 Application des effets constatés par l’apprentissage au deuxième tour.....	90
4.3.7 Au troisième tour, un apprentissage par l’observation des effets du 2 ^{ème} tour chez le voisin.....	93
4.3.8 La simulation participative, un processus d’apprentissage interactif pour une amélioration des pratiques de fertigation	94
4.4 Conclusion.....	97
Chapitre 5 : Conclusion générale	100
5.2 <i>Se servir des connaissances empiriques des agriculteurs pour produire des indicateurs de performance à mesurer.....</i>	<i>102</i>
5.3 <i>La modélisation pour montrer les effets des pratiques sur les rendements, comprendre l’influence des logiques de fertigation sur la performance agronomique des systèmes de cultures sous serres</i>	<i>104</i>
Simulation des stress en eau et en azote	104
Simulation des effets des pratiques de fertigation sur les rendements.....	104
Simulation des pertes d’eau et d’engrais	105
5.4 <i>La simulation participative pour l’amélioration des pratiques : transformer le modèle</i>	

<i>linéaire d'apprentissage en un modèle interactif multi-acteurs</i>	105
<i>5.5 Un apport méthodologique pour évaluer la performance des pratiques agricoles : vers un observatoire des pratiques agricoles</i>	107
Activité scientifiques.....	109
Références Bibliographiques.....	111
Annexes	115
Annexe 1: Calendrier vide d'irrigation et de fertilisation à remplir par l'agriculteur	115
Annexe 2 : Calcul des incertitudes	116
Annexe 3 : Fichier sortie du modèle PILOTE N « Résultat.txt ».....	121
Annexe 4 : Cycle de l'azote dans le sol.....	123

Liste des figures

Figure 01 : Situation géographique de la commune d'El Ghrous	13
Figure 2 : Photographies des serres prises dans la commune d'El Ghrous	15
Figure 3 : Evolution de dispositifs de fertilisation dans la zone d'El Ghrous	17
Figure 4 : Composition du système de goutte à goutte sous serre d'El Ghrous	18
Figure 5 : Comparaison entre les modèles de transfert de la maîtrise des pratiques de fertigation ; à gauche le modèle linéaire descendant, à droite le modèle interactif local.	24
Figure 6 : Organisation de la thèse	28
Figure 7: Type of greenhouse with its irrigation and fertigation unit	35
Figure 8: Variations in distribution uniformity during one cropping season in selected greenhouses	41
Figure 9: Relative water supply for the 25 greenhouses sampled, as influenced by access to irrigation water	43
Figure 10: Comparison of one farmer's irrigation practices with the optimum irrigation schedule proposed by AquaCrop (greenhouse n 11 of eggplants)	44
Figure 11: Variations in (1-WSL) in the sample of 25 greenhouses during the 2012/2013 cropping season	45
Figure 12: Classification of drip irrigation performances by combining indicators	46
Figure 13 : Comparaison de l'évolution des valeurs de LAI entre les mesures de terrain et la simulation par PILOTE-N chez l'agriculteur 4	55
Figure 14 : Comparaison des rendements observés et simulés avec PILOTE-N pour les douze agriculteurs suivis	56
Figure 15 : Apport d'eau et d'azote (engrais) pour la culture de tomate sous serre entre septembre 2015 et Mars 2016, cas de douze agriculteurs	60
Figure 16 : Influence des stress d'eau et d'azote sur le rendement de la tomate sous serres pour un échantillon de 12 agriculteurs (3 niveaux de performance)	62
Figure 17 : Evolution de l'état de stress en eau, cas de l'agriculteur 13	63

Figure 18 : Evolution de l'état de stress en eau, cas de l'agriculteur 3	64
Figure 19 : Evolution de l'état de stress en eau, cas de l'agriculteur 4	65
Figure 20 : Les pertes d'eau et d'azote résultant des pratiques de fertigation des douze agriculteurs suivis, résultat donné par le modèle PILOTE-N	67
Figure 21 : Schéma synthétique des étapes de la démarche participative avec les participants, les objectifs et le lieu de déroulement de chaque étape	74
Figure 22 : Calendrier type utilisant les termes locaux	76
Figure 23: Photos indiquant le taux de satisfaction des besoins en eau	77
Figure 24 : Photos indiquant le taux de satisfaction des besoins en N	78
Figure 25: Photos indiquant les trois niveaux de rendements	78
Figure 26 : Déroulement des simulations participatives chez les agriculteurs	81
Figure 27 : Déroulement de l'atelier expo-photos	83
Figure 28 : Pratiques des agriculteurs en début de l'atelier	86
Figure 29 : Evolution des pratiques de fertigation des agriculteurs	87
Figure 30 : Pratiques des agriculteurs après le deuxième tour	91
Figure 31 : Pratiques des agriculteurs après le 3^{ème} tour de l'atelier	93
Figure 32 : Répartition des photos choisies sur les axes définis	94
Figure 33 : Schéma du modèle d'apprentissage avec interaction entre les acteurs	107

Liste des tableaux

Tableau I: Characterisation of sample farms and greenhouses	36
Tableau 2 : Évolution quantitative des apports d'apports d'eau et d'azote pour les 23 agriculteurs participants dans les ateliers de simulation participative	84

Laboratoires où la thèse a été préparée :

Maitrise de l'eau en agriculture, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Hassan Badi, El Harrache-Alger

Gestion des ressources en eau, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Madinat Al Irfane, B.P.6202,Rabat-Maroc.

UMR G-Eau ;CIRAD, 361, rue JF Breton 34398 Montpellier cedex 5, France.

Chapitre 1

Introduction Générale

1. Chapitre1 : Introduction générale

1.1 Le maraichage sous serre irrigué au goutte à goutte dans la région de Biskra

Cette thèse porte sur l'évaluation de la performance des systèmes d'irrigation en se focalisant sur la technique de goutte à goutte associée au maraichage sous serre. Ce système de culture est caractéristique d'une forme récente d'agriculture saharienne, communément appelé 'maraichage sous serre'. Le développement rapide et exceptionnel par son ampleur de cette filière a permis à la wilaya de Biskra de devenir le premier fournisseur des marchés nationaux en produits maraichers en primeurs¹. Aujourd'hui, on compte près de 5950 ha de cultures maraichères sous serres dans la Wilaya de Biskra, soit 45% de la surface nationale totale des cultures maraichères sous serres en Algérie. Cette superficie de maraichage sous serre permet de produire près de 5.600.000 quintaux de légumes fraîches toutes espèces confondues à savoir : Tomate, piment, poivron, concombre, courgette, aubergine et melon (Monographie de la wilaya de Biskra, 2017 ; Séries statistiques MADRP, 2015). Ceci représente l'équivalent d'un peu plus que 112 000 serres tunnel (au minimum 20 serres par ha pour une superficie chacune de 8 par 50 mètres) qui sont irriguées exclusivement à partir de l'eau souterraine et en se servant de la technique de goutte à goutte. Ce développement combiné de maraichage sous serre associée à l'irrigation en goutte à goutte traduit la contribution effective de cette technique d'irrigation dans l'extension et l'intensification de la production maraichère sous serre dans la région.

Avant de développer notre problématique, nous allons tout d'abord mettre en lumière les étapes qu'a traversées cette nouvelle forme d'agriculture saharienne pour prendre cette place dans l'économie nationale. Nous allons également exposer les facteurs qui ont favorisé ce développement. Notre analyse sera axée sur trois aspects à savoir : la dynamique du maraichage sous serre, la contribution de la technique d'irrigation en goutte à goutte dans cette dynamique, et enfin l'expertise des agriculteurs (que nous nommerons par la suite l'« expertise d'usage ») et son évolution dans le temps.

Cette thèse a été réalisée dans la wilaya de Biskra (figure 1). Connue historiquement des "Ziban" qui est une combinaison du mot "Zab", qui signifie dans la langue ou le dialecte du désert Algérien, "l'oasis du palmier", Ibn Khaldoun a défini l'oasis comme "une grande patrie

¹ Les légumes primeurs sont des productions mises à la vente avant la saison de pleine production, qu'elles aient été obtenues par une culture protégée, ou qu'elles proviennent de régions aux conditions climatiques favorables. Ils sont distingués par leur période de consommation et non pas par leur mode de culture.

comprenant plusieurs villages voisins rassemblés d'abord en Zab Docen, puis en Zab Melili, en Zab Biskra. Zab Tehoda, Zab Bads. Le Zab Biskra est le plus important de ces villages.

A l'intérieur des Ziban, nous nous mené notre travail de terrain dans la commune d'El Ghrous (figure 1), appartenant à ce qu'on appelait anciennement 'Zab Elgharbi' ou le Zab de l'Ouest. Cette commune a connu une dynamique particulière de la maraichage sous serre en commençant de l'introduction des premières serres en 1984 irriguées traditionnellement en irrigation gravitaire jusqu'à ce qu'on arrive au modèle actuel de serres irriguées en goutte à goutte. Cette zone a connu une entrée des allochtones venants du Nord du pays notamment de la Mitidja où cette spéculation était pratiquée antérieurement. Leur arrivée dans la zone a participé également dans cette dynamique.

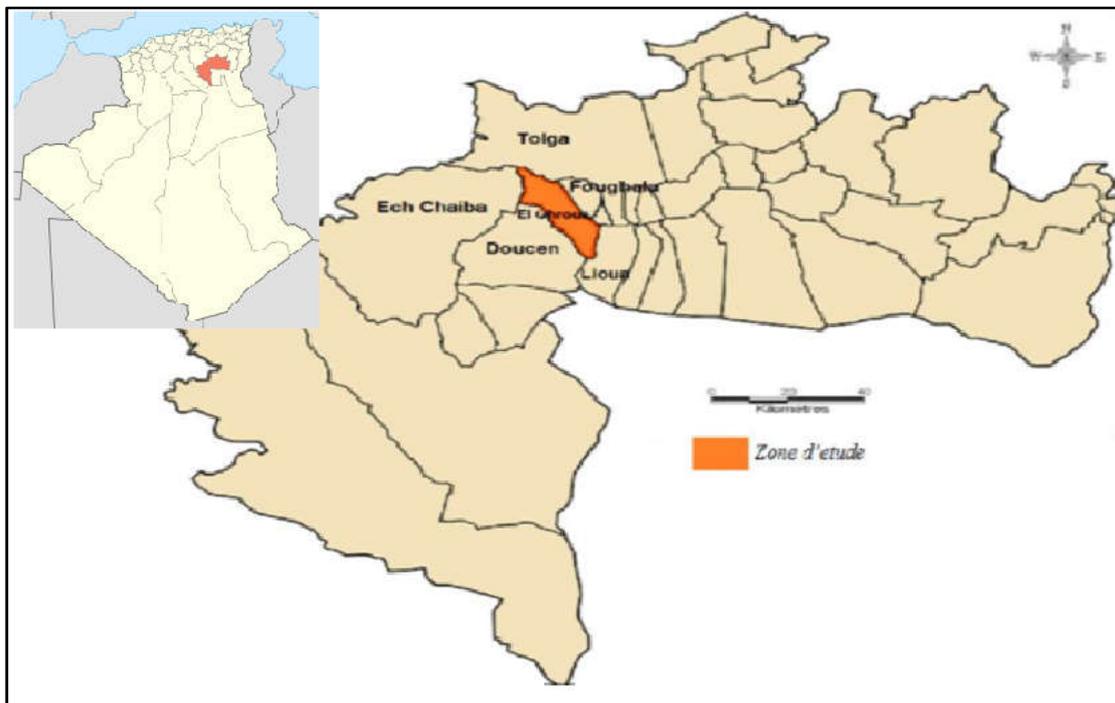


Figure 01 : Situation géographique de la commune d'El Ghrous

1.2 Transformations des systèmes agraires dans les Ziban

L'agriculture saharienne est caractérisée par un système oasien, basé essentiellement sur la culture du palmier dattier. Les autres spéculations étaient pratiquées à des fins d'autoconsommation et de quelques échanges commerciaux au niveau des marchés locaux. Kessah (1994), a défini l'oasis comme étant un lieu habité où la vie se concentre autour de ressources d'eau. C'est un espace agricole irrigué, cultivé intensivement, le système de culture est caractérisé par plusieurs étages en plus de la palmeraie (Amichi, 2018).

Pendant les trente dernières années, un vaste processus de transformation et de réformes structurelles a permis de faire émerger des expériences et des pratiques nouvelles, ainsi qu'un certain nombre de stratégies économiques et sociales. Aujourd'hui, l'agriculture saharienne est orientée vers les marchés nationaux et internationaux avec des débouchés principalement en dehors des oasis (Côte, 2002). Amichi (2018) a décrit cette transformation et les différents modèles intermédiaires d'agriculture saharienne : le passage par étape d'une agriculture oasienne multi-strate, à une tentative d'agriculture saharienne d'agro-business basé sur un modèle monoculture intensif (céréales) et enfin la néo-agriculture saharienne, plus diversifié et basé sur le maraichage en dehors des oasis, mais associée au développement de nouvelles palmeraies.

Les changements remarquables dans le paysage du milieu aride sont traités par de nombreux auteurs et chercheurs, ces derniers optaient pour le terme de mutation ce qui donne plus d'importance à ce changement vu son impact ressenti à plusieurs échelles. Plusieurs facteurs ont contribué à ces mutations ; la disponibilité de la ressource en eau avec un accès à la ressource souterraine lié au développement des forages et des motopompes, l'importance des surfaces agricoles ajoutant à cela la disponibilité du marché pour la commercialisation des productions (Dubost, 2002). En profitant des marchés urbains du nord du pays, des petits propriétaires ont permis un « remarquable développement agricole, notamment aux Ziban, qui illustre la formidable capacité dont sont capables des communautés rurales », et ce, dans des conditions climatiques extrêmes (Bendjelid, 2003). L'accès facilité au capital et au savoir-faire est assuré localement suite à des arrangements qualifiés d'informels. Ceci a contribué activement au développement des petites exploitations agricoles à petite échelle.

Comme dans beaucoup de pays du Sud, le développement de l'accès à l'eau souterraine a été un facteur clé dans l'émergence de ce modèle d'agriculture plus intensif et basé sur des cultures à haute valeur ajoutée (Daoudi et Lejars, 2016). Ceci nécessite le recours à des ressources en eau dont les débits sont plus importants. L'exploitation de la ressource en eau souterraine profonde, rendue possible grâce aux nouvelles techniques d'exhaure, a ainsi profondément modifié les perspectives de l'agriculture au Sahara et ont progressivement fait émerger l'idée d'une agriculture non plus « oasienne » mais « saharienne »" (Côte, 2002 ; Amichi 2018). Ce développement conduit à une pression très forte sur les ressources en eau, classant les pays d'Afrique du Nord, et l'Algérie en particulier, parmi les principales régions d'utilisation intensive des eaux souterraines pour l'agriculture (Siebert et al., 2010 ; Daoudi et Lejars., 2016). La préservation de cette ressource est en conséquence un enjeu très important.

Quant à la ressource en sol, l'avènement de la mise en œuvre de la loi 83-18 relative à l'Accession à la Propriété Foncière Agricole (APFA) en 1983, a permis officiellement le déverrouillage de l'accès au foncier agricole par les exploitants privés (Daoudi et Lejars., 2016 ; Amichi et al., 2018)., et à l'eau souterraine également.

Le recours à un financement informel est très souvent adopté par les agriculteurs, ça concerne en particulier les intrants à savoir les engrais, les produits phytosanitaires, les lignes (gaines) de goutte à goutte et aussi la semence, elles peuvent être acquises par un crédit auprès des grainetiers (Naouri et al., 2017).

1.2.1 La dynamique du maraîchage sous serre associé au goutte à goutte à El Ghrous

A Biskra, et dans l'année 1984, les premières serres ont été introduites par l'état au niveau d'une ferme pilote dans la commune agricole d'El Ghrous. Elles ont servi d'expérience au profit des agriculteurs de la zone afin de les encourager à produire des primeurs. Les serres que nous avons étudiées sont de type tunnel, couvertes en plastique, caractérisées par des parois latérales semi-circulaires de 50 mètres de longueur et d'une largeur qui varie entre 8 à 9 mètres (figure 2). Les arcs formant la structure de la serre sont en fer galvanisé. Il y a une porte à chaque extrémité du tunnel (avant et arrière) pour ventiler ces serres à faible technicité. Tous les composants de la serre sont fabriqués localement (Laib et al., 2018). Ces serres qui sont apparues en marge des oasis, ont ouvert la voie à des dynamiques agraires portées par le maraîchage et plus seulement par le palmier dattier (Amichi et al., 2015).



Photographie d'une serre cultivée en piment

Photographie montrant la disposition des serres au sein d'une exploitation

Figure 2 : Photographies des serres prises dans la commune d'El Ghrous

Lors de l'introduction des premières serres, les cultures étaient irriguées par la méthode traditionnelle 'gravitaires à la raie' ou connue localement par 'El Alma' (Naouri et al., 2017).

Cette pratique demande de grands volumes d'eau et d'intrants (engrais principalement) et exige un travail laborieux à l'intérieur des serres. Cette importante charge de travail, constatée par les agriculteurs, concernait à la fois la répartition de l'eau entre les rangées de plants, et aussi l'élimination des mauvaises herbes très abondantes favorisées par les importantes quantités d'eau et d'engrais introduites dans la serre. Ceci constituait un frein pour la spéculation malgré l'importance de sa production.

Une première introduction du système goutte à goutte pour les serres était faite chez des agriculteurs référents au milieu des années 1990, ce modèle était rapidement rejeté, il n'était pas adapté au contexte local, de plus le matériel était chère (Naouri et al., 2017).

A partir des années 2000, et avec le lancement du Programme National du Développement Agricole, le maraichage cultivé sous serre a connu un nouveau rythme suite aux subventions apportés par l'état pour l'acquisition des serres tunnels et du système goutte à goutte, en plus des forages d'eau, des bassins de stockage (Khiari, 2002). A partir de là, on assiste à une dynamique importante du maraichage sous serre associé à l'irrigation au goutte à goutte. Vers l'année 2010, la majorité des agriculteurs de la région des Ziban ont adopté l'irrigation en goutte à goutte pour leurs cultures maraichères cultivées sous serres (Naouri et al., 2017).

L'arrivée des jeunes agriculteurs venus du principal territoire de production maraichère en Algérie (la Mitidja et la zone côtière autour de Tipaza, Blida et Ain Defla) ont augmenté le rythme de l'extension de la surface cultivée en maraichage sous serre (Naouri et al., 2017).

Cette augmentation rapide du nombre de serre dans un espace limité accentue considérablement les volumes d'eau pompés à partir de la nappe. L'enjeu dans ce cas est triple, il concerne à la fois la ressource en eau, en sol et aussi en énergie.

Toutes ces surfaces irriguées à partir du goutte à goutte nous conduisent à se questionner par rapport à l'importance des ressources mobilisées afin de produire ces légumes primeurs. Ces ressources en sol, en eau et aussi en énergie comment sont-elles utilisées ?

1.2.2 Le goutte à goutte associé au maraichage sous serre à El Ghrous

Par ailleurs, si le goutte à goutte a d'abord été introduit dans des grandes exploitations à l'exemple des exploitations phoenicicole dans notre zone d'étude, suivant une conception classique du système d'irrigation (station de tête avec régulation de pression, station de filtration, station de fertigation, portes-rampes, rampes etc.), aujourd'hui il y a une grande diversité de systèmes de goutte à goutte. Naouri (2019) a qualifié ce processus de transformation par le terme 'innovation technique' du goutte à goutte, une description

diachronique propre à la zone d'El Ghrous a été faite pour les principales étapes de l'innovation à savoir : i) l'introduction de la technologie 1991-2000, ii) développement du réseau d'innovation 2000-2008 et iii) l'innovation fabriquée 2009-Aujourd'hui.

Par exemple, dans la région de Biskra, les agriculteurs ont conçu des systèmes de fertigation individualisés et miniaturisés et ont enlevé le système de filtration (figure 3), puisque celui-ci réduit la pression disponible dans le système. Les agriculteurs jugent par ailleurs que la bonne qualité de l'eau (peu de sédiments) les dispense du filtre. L'apport d'engrais par fertigation était la pratique dont les agriculteurs locaux se souciaient le plus. Notre argumentation est que la cause de l'échec de l'installation classique soutenue par l'Etat était son incapacité de gérer, avec une même station de tête la fertigation de plusieurs serres cultivées différemment avec évidemment différents besoins en engrais.



Station de tête centralisé de fertilisaion

Unité de fertlisation représenté par le bison

Dispositif innovant de fertlisaion motorisé

Figure 3 : Evolution de dispositifs de fertilisation dans la zone d'El Ghrous

Il n'y a pas seulement la spécificité de gestion décentralisée de la fertilisation qui a fait que ce système actuel de goutte à goutte devient une partie importante de tout le système de production sous serre dans la région des Ziban. Il faut noter également la simplicité et le caractère peu onéreux des matériaux qui le composent. En partant de l'organisation des agriculteurs autour d'un forage d'eau à usage collectif, Naouri et al. (2017) décrivent en détail les différents éléments de ce système goutte à goutte. En commençant par la partie commune, à l'exemple du régulateur de pression à la sortie du forage, le « château d'eau » (figure 4). Il s'agit d'un équipement de régulation de pression installé directement à la sortie du forage. D'une longueur variable entre 10 et 15 m (en fonction de l'éloignement des serres à irriguer à partir du forage, le château d'eau constitue un élément essentiel de tout le système d'irrigation. Installé à la charge du propriétaire de la terre et du forage évidemment, les agriculteurs se servent du château d'eau comme un indicateur de pression, c'est-à-dire, du

moment que l'eau de déborde pas de son extrémité, on peut irriguer davantage de serres au même temps. D'un point de vue hydraulique, le « château d'eau » et de par son hauteur, assure une pression de service stable (de 1 à 1,5 bar à sa sortie), ceci assure une gamme de pression assez stable pour pompe immergé du forage, ce qui augmente sa durée de vie. De plus, le « château d'eau » protège la pompe au moment de la fermeture brusque des vannes de distribution.

Les conduites de distribution primaire et secondaire, et à l'échelle de la parcelle et la serre à savoir l'unité de fertigation (figure 4), les portes rampes et les lignes de goutte à goutte en gaines souples (figure 4). A l'exception des parties communes, tout le système est mobile et renouvelable (Laib et al., 2018). La partie commune est prise en charge par le propriétaire de la terre et du forage, tandis que l'acquisition de l'installation à l'échelle de la parcelle est à la charge de l'agriculteur (locataire en général). L'estimation économique du coût de l'installation de goutte à goutte montre qu'il représente moins de cinq pourcent (5%) par rapport au cout global de l'investissement (serres comprises). Mais comme ce matériel est considéré comme consommable, on estime sa valeur par rapport à la charge annuelle d'exploitation (semences, fertilisants, produits phytosanitaires), celle-ci ne dépasse pas les dix pourcent (10%), sans compter le cout de main d'œuvre (Naouri et al., 2017).



« Château d'eau » à la sortie d'un forage



Conduites d'amenées apparente en PVC



Gainages de goutte à goutte installée à l'intérieur d'une serre

Figure 4 : Composition du système de goutte à goutte sous serre d'El Ghrous

Même si le coût du système de goutte à goutte est faible par rapport aux autres charges de l'exploitation déjà cités, les agriculteurs attachent une grande importance à sa composition et son utilisation. Il s'agit de fournir la bonne quantité d'eau au bon moment, mais aussi une fertilisation précise et adéquate pour obtenir de bons rendements au moment où les prix des légumes sont élevés sur le marché. De ce fait, ce système de goutte à goutte est qualifié de « performant » par ses utilisateurs. En revanche il n'existe pas de dispositif d'évaluation de

ces performances en lien avec les normes théoriques. Cette question fait partie de notre question de thèse précisée ci-après.

1.2.3 L'expertise d'usage ou le savoir faire local associé au modèle local de goutte à goutte sous serre

Le passage de l'irrigation gravitaire traditionnelle à l'irrigation en goutte à goutte implique un changement dans les calendriers d'irrigation en durées et fréquence, et aussi de la fertilisation. Les engrais utilisés précédemment étaient de nature granulée hydrosoluble à application directe au voisinage des plates. Ce n'est qu'à partir de 2006 et avec l'introduction de engrais hydrosoluble que les agriculteurs ont commencé d'apporter de l'engrais en utilisant le goutte à goutte (Naouri, 2019). Ceci implique que les formulations en NPK et aussi les quantités à apporter par irrigation et par culture vont changer. Ce passage exigeait un accompagnement qui a été assuré essentiellement par les grainetiers² d'El Ghrous. Ces derniers et de par leurs savoir, fournissent des conseils aux agriculteurs au moment de la vente des intrants. Ce savoir faire que détiennent les grainetiers est une expertise technique provenant soit de leurs cursus de formation d'ingénieur, soit de leur contact permanent avec les ingénieurs développeurs appartenant aux firmes d'intrants qui, et à travers les expériences réalisés sur les semences, les produits phytosanitaires et les engrais, acquièrent une expertise technique et essaient de la transmettre aux acteurs de terrain et en particuliers les grainetiers. Naouri (2019) affirme que les jeunes agriculteurs venant du Nord (Tipaza en particulier), ont ramené une expertise dans l'utilisation du goutte à goutte sous serres, *« Ils avaient de l'expérience dans la production de tomates dans les serres associées à l'irrigation goutte à goutte. L'irrigation au goutte à goutte avait déjà été testée dans leur région d'origine, ils ont été en mesure de trouver tout ce dont ils avaient besoin pour cultiver sous serre (serres, systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte, intrants agricoles) et ont eux-mêmes apporté leur expertise »*.

De ce fait, cette maîtrise de la pratique de fertigation constitue la finalité de croisement de plusieurs sources d'apprentissage locales à savoir : l'expérience individuelle, les interactions entre agriculteurs, généralement les plus expérimentés (allochtones en particuliers) et les interactions avec les grainetiers (vente/conseil). Ce savoir faire en fertigation par usage du goutte à goutte a pu être diffusé entre les agriculteurs de la zone grâce à l'interactivité et la mobilité des agriculteurs dans la zone d'étude. A l'intérieur d'une exploitation agricole de

²Grainetier, c'est une fonction rattachée au vendeur des intrants : semence, produits phytosanitaire, engrais et matériel d'irrigation et des outils agricoles, généralement ils détiennent un savoir faire qu'ils essaient de le transmettre aux agriculteurs de la zone au moment de la vente.

maraichage sous serre, on peut trouver, pour une superficie de 10 ha, de 30 à 75 jeunes agriculteurs (ouvriers, locataire, métayers ou propriétaire) qui se côtoient au quotidien le long d'une saison agricole (Naouri et al., 2015), ceci constitue un lieu d'apprentissage surtout pour les jeunes agriculteurs nouvellement impliqués dans le maraichage sous serre. De plus, un des systèmes de production caractéristiques de la zone d'étude qui est le système mobile de front pionnier (Amichi et al., 2015 ; Naouri et al., 2015) dans lequel la mobilité des jeunes agriculteurs est importante à l'échelle de la zone d'étude a favorisé la conjugaison et le transfert du savoir faire à une échelle supérieure à l'exploitation agricole.

Il en résulte ce que nous appelons dans notre thèse une 'expertise d'usage'. Cette expertise d'usage sera mobilisée et valorisée dans le cadre de cette thèse pour créer un dialogue entre expertise scientifique, technique et expertise d'usage.

Notre hypothèse est que cette expertise d'usage résultant du croisement entre ces sources d'apprentissage, est différente entre les agriculteurs, d'où la différence dans la performance.

Cette expertise d'usage locale mérite d'être analysée, ceci en se basant sur une approche innovante pour son évaluation, mais aussi pour son amélioration.

1.3 Performances de la technique d'irrigation au goutte à goutte : la confrontation au réel

L'irrigation localisée est reconnue comme une technique efficace d'apport d'eau à la culture. En la comparant à l'irrigation par aspersion ou à la raie, les pertes d'eau sont minimales au moment du transport et son application se fait immédiatement au voisinage de la plante (Benouniche et al., 2014). De plus, la technique d'irrigation au goutte à goutte assure, en principe, une bonne uniformité d'arrosage, permettant ainsi l'augmentation de la production de la culture irriguée (Wang et al., 2013). En plus de l'aspect économie de l'eau (efficacité hydraulique) et augmentation de rendements (efficacité agronomique), le goutte à goutte offre à ses utilisateurs une facilité d'utilisation à l'échelle de l'exploitation, en minimisant ainsi la charge de travail nécessaire pour irriguer une surface cultivée. Tous ces facteurs favorisent l'extension rapide de la surface irriguée en goutte à goutte.

Dans la littérature, l'efficacité hydraulique de l'irrigation au goutte à goutte est estimée autour de 90 – 95% (Van der Kooij et al., 2013). Ces valeurs sont obtenues dans des conditions idéales d'utilisation en laboratoire ou en station expérimentale (van der Kooij et al., 2017). Dans des conditions réelles de terrain, très peu d'études sont menées afin d'évaluer l'efficacité de cette technique d'irrigation (Van der Kooij et al., 2017). Les études récentes au

Maghreb montrent que les performances obtenues sur le terrain sont souvent bien inférieures aux valeurs théoriques (Benouniche et al., 2014).

Mesurer les performances hydrauliques *in situ* pour une diversité de systèmes de goutte à goutte demande un protocole de recherche exigeant. Il faut un échantillon de parcelles, représentant la diversité des systèmes d'irrigation et des profils d'agriculteurs. Deux facteurs peuvent influencer l'efficacité 'de référence' de cette technique ; le premier étant en lien avec les conditions de terrain, le second en fonction de la forme ou la composition du système de goutte à goutte « low-cost » avec la variabilité que peut prendre le système d'une parcelle à une autre en fonction de la diversité de ses utilisateurs.

Pour le premier facteur, l'influence des conditions de terrain sur l'efficacité peut être de type physique et dépend de la qualité de l'eau, le type de sols et la topographie de terrain, et l'influence de conditions climatiques sur le matériel. Comme cela peut être de type organisationnel et dépendant des conditions de partage de l'eau d'irrigation. Comme nous le verrons plus tard, nous avons choisi dans cette thèse une entrée par les pratiques de l'agriculteur, parce que celles-ci reflètent ces conditions de terrain.

Le second facteur est spécifique au modèle de goutte à goutte utilisé dans la parcelle à étudier. Notre argumentation est que la composition du système influence directement son efficacité. Par exemple l'absence d'un système de filtration favorise le colmatage des goutteurs. Aussi, une faible pression de l'eau dans le réseau d'irrigation due à l'absence d'un système de pompage conduit à une baisse de la valeur de l'uniformité de distribution des goutteurs.

Le troisième facteur est lié aux conditions de pilotage de l'irrigation et de la fertigation en lien avec les contraintes de l'agriculteur. Les agriculteurs se différencient entre eux en fonction de la manière dont ils sont contraints à l'accès aux deux composants : l'eau et les fertilisants. On peut citer l'exemple d'un agriculteur locataire dont l'accès à l'eau est limité par un tour d'eau et d'un autre propriétaire pouvant irriguer à tout moment. De même que pour les fertilisants, où le capital social permettant à l'agriculteur de s'approvisionner en intrants (dont les fertilisants) par crédit auprès des grainetiers constitue une contrainte qui survient différemment entre les agriculteurs.

En conclusion, pour mener une analyse de la performance du terrain et pour ensuite améliorer la performance hydraulique, il est important de bien comprendre les conditions de terrain, ainsi que la composition du système de goutte à goutte. Le pari de cette thèse a été d'associer étroitement les agriculteurs dans le protocole de recherche depuis le début. Ceci est pour tenir

compte des trois aspects suivants à savoir : mieux comprendre les conditions de terrain dans lesquelles opère l'agriculteur ; mieux comprendre les logiques et les contraintes des agriculteurs, qui peuvent expliquer les pratiques d'irrigation ; et une ambition d'améliorer les performances hydrauliques, agronomique et environnementale du goutte à goutte dans les conditions réelles de son utilisation.

1.4 L'importance des pratiques

1.4.1 Faire parler l'agriculteur sur ses pratiques

Peu de travaux scientifiques ont porté sur la mobilisation combinée des indicateurs de performance hydraulique et agronomique dans un travail de terrain à cause de la difficulté de produire de l'information. Peu de références bibliographiques sont disponibles. Dans cette thèse, nous avons fait le choix de nous intéresser au plus près aux pratiques réelles d'irrigation et de fertilisation des agriculteurs, qui constituent l'objet principal de l'étude. Ce prisme rejoint une certaine tradition dans les travaux agronomiques, privilégiant l'étude des pratiques (culturales) comme entrée : « *En analysant les pratiques des agriculteurs, en considérant leurs objectifs et leurs savoirs, en les combinant avec leurs connaissances scientifiques, les agronomes ont appris à concevoir des procédés de culture plus pertinents* » (Papy, 2003). Ceci implique que l'agriculteur participe à la fois dans la production de l'information, dans la construction des indicateurs d'évaluation, dans la co-construction des voies d'amélioration des performances et enfin dans le processus de diffusion des apprentissages à l'échelle locale. Poussin (2008) a évoqué ce mode de diagnostic des performances des agriculteurs sur le terrain et qui s'articule sur la logique de leurs actions, à l'adaptation de ces actions à la situation en cours, notamment les conditions climatiques, et aux indicateurs utilisés pour choisir et décider (Le Grusse et al, 2011).

Dans notre hypothèse, le pari de faire contribuer l'agriculteur dans une démarche d'autoévaluation des pratiques de fertigation constituera un point de départ pour une réflexion sur les approches de conseil agricole qui visent l'amélioration de ces pratiques. La perception des indicateurs et leurs effets sur la production constituent un élément important dans l'examen des pratiques.

La décision d'inclure l'agriculteur dès le début dans le protocole de recherche a donc influencé le choix de l'objet de recherche, qui s'est élargi de la performance hydraulique à une analyse conjuguée de la performance de l'irrigation et de la fertilisation. Cette analyse quantitative et qualitative de la gestion de l'eau et des engrais à l'échelle de la serre ne sera

d'utilité, pour l'agriculteur, qu'après l'avoir complétée d'une analyse la productivité de ces deux éléments. Le rendement à la serre constitue une priorité pour l'agriculteur, de ce fait, il est important de le prendre en considération dans le processus d'évaluation du système goutte à goutte. La performance agronomique du système est au centre d'intérêt de l'agriculteur. Dans cette logique, l'implication des agriculteurs dans le processus d'évaluation consiste à les amener à accompagner le processus d'analyse à différentes phases, à commencer par la familiarisation avec les spécificités du système de goutte à goutte sous serre, le diagnostic du fonctionnement de ses différentes composantes et la diffusion de leurs pratiques de fertigation. Dans une dernière phase, les voies d'amélioration possibles étaient recherchées en concertation avec les agriculteurs mêmes dans le cadre d'un travail participatif.

Dans cette optique, et afin de rendre efficace le processus d'évaluation de la performance, nous allons mobiliser dans cette thèse des indicateurs qui représentent une mise en conformité à la littérature de certains phénomènes physiques perceptibles par les agriculteurs.

1.4.2 La modélisation pour objectiver scientifiquement les performances

L'utilisation de modèles de cultures pour représenter l'effet des pratiques sur les performances a pour but d'affiner notre diagnostic mais aussi de réfléchir aux leviers d'amélioration. Cette dernière concerne à la fois la variation du bilan hydrique, d'une part, et du bilan azoté d'autre part, ainsi que l'influence des deux sur la production de biomasse et le rendement de la culture. La modélisation permet aussi d'appréhender les impacts environnementaux par le calcul des pertes en eau et les lessivages d'azote.

L'utilisation des modèles en agriculture est souvent liée à des essais basés sur l'expérimentation et en condition généralement contrôlées. Dans un travail de recherche en conditions réelles, un calibrage préalable des paramètres physiques mobilisés par l'outil informatique est nécessaire. Plus le nombre de paramètres physiques mesurés est élevé, meilleur est le résultat de la simulation. Ceci justifie l'importance d'impliquer l'agriculteur dans le processus de collecte de données, il est le meilleur connaisseur de sa culture.

Deux modèles de cultures sont mobilisés, le premier est le modèle Aquacrop développé par la FAO (Steduto et al., 2007, 2009) ; le deuxième est le modèle PILOTE-N développé par l'IRSTEA (Mailhol et al., 2018, Albasha et al., 2016).

Dans notre approche, le recours à la modélisation, et en plus de l'intérêt relatif à la compréhension des effets des pratiques sur la culture, permet de simuler des pratiques variables. Ceci en fait un outil pédagogique d'apprentissage.

1.4.3 L'interactivité, élément central dans une perspective d'amélioration des pratiques

Le savoir-faire local des agriculteurs en matière de pratiques d'irrigation et de fertilisation constitue une partie importante dans notre approche. Les enquêtes de terrain permettent de définir la modalité d'apprentissage des agriculteurs. Ceci repose sur les interactions entre les acteurs de différents profils. La figure 5 représente un schéma montrant les interactions entre les acteurs intervenant (d'une façon directe ou indirecte) dans le processus de transfert de savoir faire en fertigation par goutte à goutte.

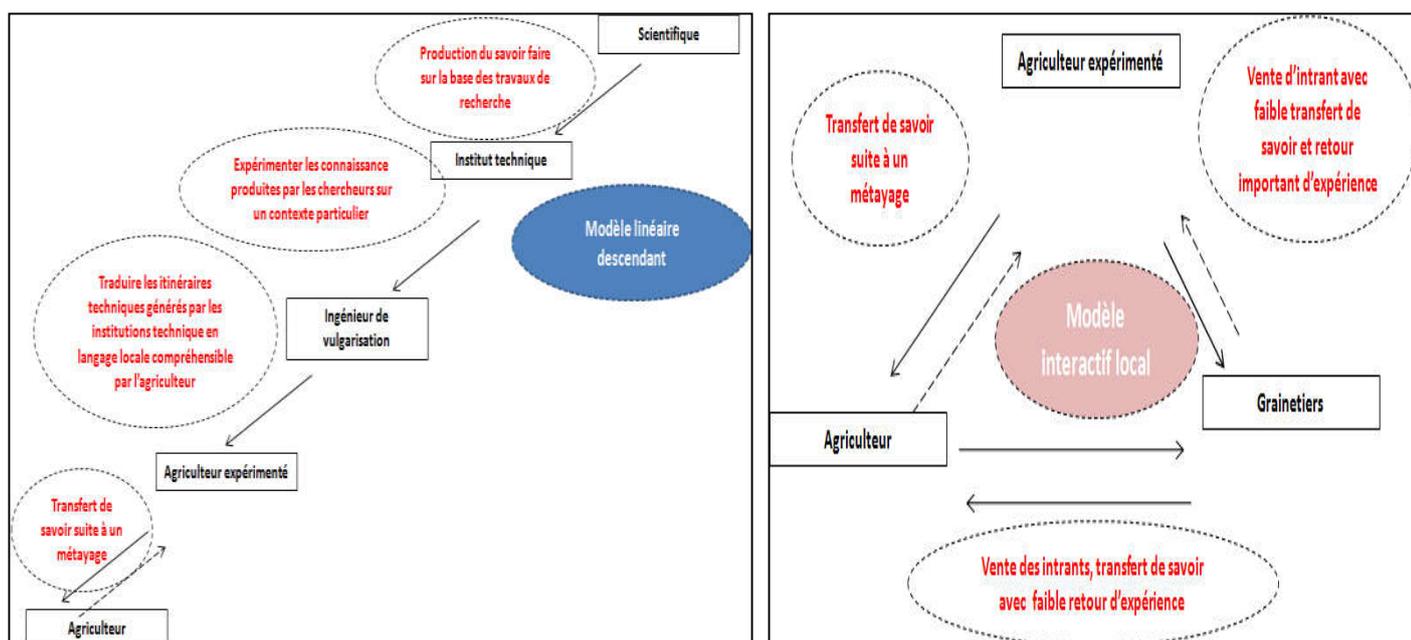


Figure 5 : Comparaison entre les modèles de transfert de la maîtrise des pratiques de fertigation ; à gauche le modèle linéaire descendant, à droite le modèle interactif local.

Le schéma représente deux formes d'échange distinctes ; pour la première, il s'agit d'une forme descendante et monodirectionnelle du transfert du savoir faire qui considère l'agriculteur comme un simple apprenant et comme un dernier élément de la chaîne de transfert. Papy (2004) qualifie ce type de transfert de savoir faire par la nomination 'linéaire'. Il décrit son cheminement comme suit : invention par le chercheur, test d'adaptation à différentes situations, promotion par les vulgarisateurs, adoption par quelques exploitations pilotes et diffusion à grande échelle. Dans ce processus, l'agriculteur n'est pas directement partie-prenante et les solutions sont souvent mal adaptées aux conditions réelles du terrain. De ce fait, le modèle linéaire est aujourd'hui largement remis en cause dans la littérature.

La deuxième forme est plus circulaire, et dans laquelle les interactions sont plus présentes. Ceci représente une forme d'apprentissage interactif local, mais à petite échelle et où la

production de l'information est essentiellement basée sur un retour d'expérience des pratiques empiriques entre les agriculteurs expérimentés et les vendeurs d'intrants (grainetiers). Il est à signaler l'intérêt commercial affiché par les agriculteurs pour les informations qui proviennent des grainetiers.

Notre hypothèse est que le transfert de ce savoir aux agriculteurs devra être accompagné par des démarches de conseil. Cette dernière en absence de terrain de démonstration, pourra ne pas les intéresser. Pour cela, adopter une démarche qui réunit à la fois l'aspect scientifique de l'information issu des acteurs du premier modèle avec l'interactivité et l'échange caractérisant le deuxième constituera probablement une approche efficace de conseil agricole où l'agriculteur aura la posture d'acteur actif dans le processus d'apprentissage.

1.5 Objectifs de la thèse

L'objectif principal de la thèse est d'élaborer et mettre en œuvre une approche méthodologique innovante pour analyser la performance de fertigation en goutte à goutte dans les conditions réelles des agriculteurs. L'idée inspirée de la littérature que pour concevoir des systèmes techniques qui fonctionnent, il faut combiner des connaissances scientifiques (expertise technique) et empiriques (expertise d'usage) était le point de départ de notre réflexion (Girard et al., 2005 ; Caneill, 2006). En effet, la première hypothèse est qu'il faut s'intéresser à la fois à la dimension hydraulique (fonctionnement de l'installation) et aux pratiques d'irrigation et de fertilisation des agriculteurs pour mettre en lumière leurs logiques. La deuxième hypothèse du travail est qu'il est important de faire cette analyse dans les conditions réelles de terrain. La troisième est que l'agriculteur doit être au centre de tout le processus, c'est-à-dire : il participe à la fois dans la production de l'information, dans la construction des indicateurs d'évaluation, dans la co-construction des voies d'amélioration des performances et enfin dans le processus de diffusion des apprentissages à l'échelle locale.

Pour atteindre ces objectifs, nous émettons les questions suivantes :

- Comment se servir des connaissances des agriculteurs en matière de maîtrise de l'installation de goutte à goutte sous serre pour proposer des indicateurs de performance? A quel niveau d'efficience hydraulique et de performance se situent les agriculteurs dans les serres tunnels de Biskra ?
- Quelles conséquences sur le rendement ont les logiques de fertigation des agriculteurs ?
- comment mobiliser un modèle de recherche pour objectiver les performances des pratiques de fertigation ?
- En plus des acteurs se trouvant derrière le référentiel local des pratiques de fertigation,

une démarche participative peut-elle trouver sa place pour discuter les pratiques en vue de les améliorer ?

1.6 Méthodologie

1.6.1 Co-analyse des pratiques avec les agriculteurs

La valeur ajoutée de ce travail est que l'agriculteur lui-même participe à la phase de production de l'information. Afin de les engager dès le départ dans le processus, nous impliquerons les agriculteurs dans la production d'informations sur leurs pratiques par le remplissage par eux-mêmes des calendriers d'irrigation et de fertilisation.

Les calendriers d'irrigation sont constitués sur la base des durées (h/j) et dates des irrigations. Pour les durées, la variabilité était fonction du stade végétatif de la culture. Concernant les dates, leur constitution tenait bien compte du tour d'eau propre à chaque agriculteur. Ce tour d'eau fixé à deux fois par semaine, est stable depuis le début jusqu'à la fin du cycle. Une exception doit cependant être faite pour les deux premières semaines qui coïncident avec la période de repiquage des plants dans la serre, période pendant laquelle les jeunes plants exigent des irrigations plus fréquentes.

Cette constitution des timings des irrigations était accompagnée par une phase de mesure des débits moyens par serre. Cette dernière s'est faite à l'intérieur de la serre, pendant la mi-saison, un échantillon 16 goutteurs par serre sont sélectionnées en respectant la méthodologie proposée par Karmeli and Keller (1974), et ont fait l'objet de mesures de débit. La moyenne arithmétique des 16 débits mesurés a été ensuite calculée.

A partir de là, les doses des irrigations ont pu être estimées. Il est à noter que la variabilité des débits (entre le début et la fin du cycle) engendrée par le phénomène de colmatage des goutteurs (suite à l'utilisation des engrais solides hydrosolubles) n'a pas été considérée.

La déduction des calendriers de fertilisation s'est faite sur la base des déclarations des agriculteurs mêmes. Les apports ponctuels sont dressés en quantité et en type d'engrais (composition en N.P.K). Ceci était combiné au calendrier d'irrigation, l'exemple en annexe 2 montre les détails de calcul.

1.6.2 Analyse des effets des pratiques par la modélisation sur le plan hydraulique et agronomique

Les stress hydrique et azoté ont été utilisés comme indicateur de performance agronomique dans ce travail. En se référant à besoins théoriques en eau et fertilisant, et par l'utilisation de

modèles de bilan hydrique, nous allons montrer les écarts de productions que peuvent avoir les pratiques réelles par rapport aux normes en vigueur.

Deux modèles ont été mobilisés dans la thèse. Le premier est un modèle de bilan hydrique Aquacrop (Steduto et al., 2007, 2009) qui a été utilisé pour simuler l'effet des pratiques d'irrigation agriculteurs sur le stress hydrique de plusieurs types de cultures. Le second est le modèle de culture Pilote-N (Mailhol et al., 2018), il a été mobilisé pour une culture spécifique, la tomate sous serre, à ce stade, l'analyse des pratiques a concerné à la fois l'eau et les fertilisants (l'Azote en particulier) avec prise en considération des effets des deux stress hydrique et azoté sur les rendements de la tomate sous serre, ce qui en fait son originalité.

Un travail de calibrage des deux modèles sera conduit est fait. Ceci concerne les conditions : édaphique, climatique et de culture.

1.6.3 Conception et la mise en œuvre d'une approche participative pour débattre et améliorer les pratiques de fertigation.

L'autre valeur ajoutée consiste à la proposition d'une approche qui vise l'amélioration des pratiques de fertigation des agriculteurs. Deux concepts sont à mobiliser dans cette approche, la participation, et l'apprentissage par simulation. Ceci nous a amené à introduire la notion de 'simulation participative'. L'apprentissage par simulation permet une auto-réflexion et une remise en question des propres pratiques des agriculteurs (Martin, 2014, Dolinska, 2017). Le concept de la participation a été associé à cette approche d'apprentissage par simulation, dans notre logique, faire participer l'agriculteur dans le processus d'apprentissage le rendra efficace.

1.7 Organisation de la thèse

À la suite de ce chapitre introductif, quatre chapitres, dont un article, constitueront cette thèse. La figure 6 donne un aperçu de l'organisation des chapitres.

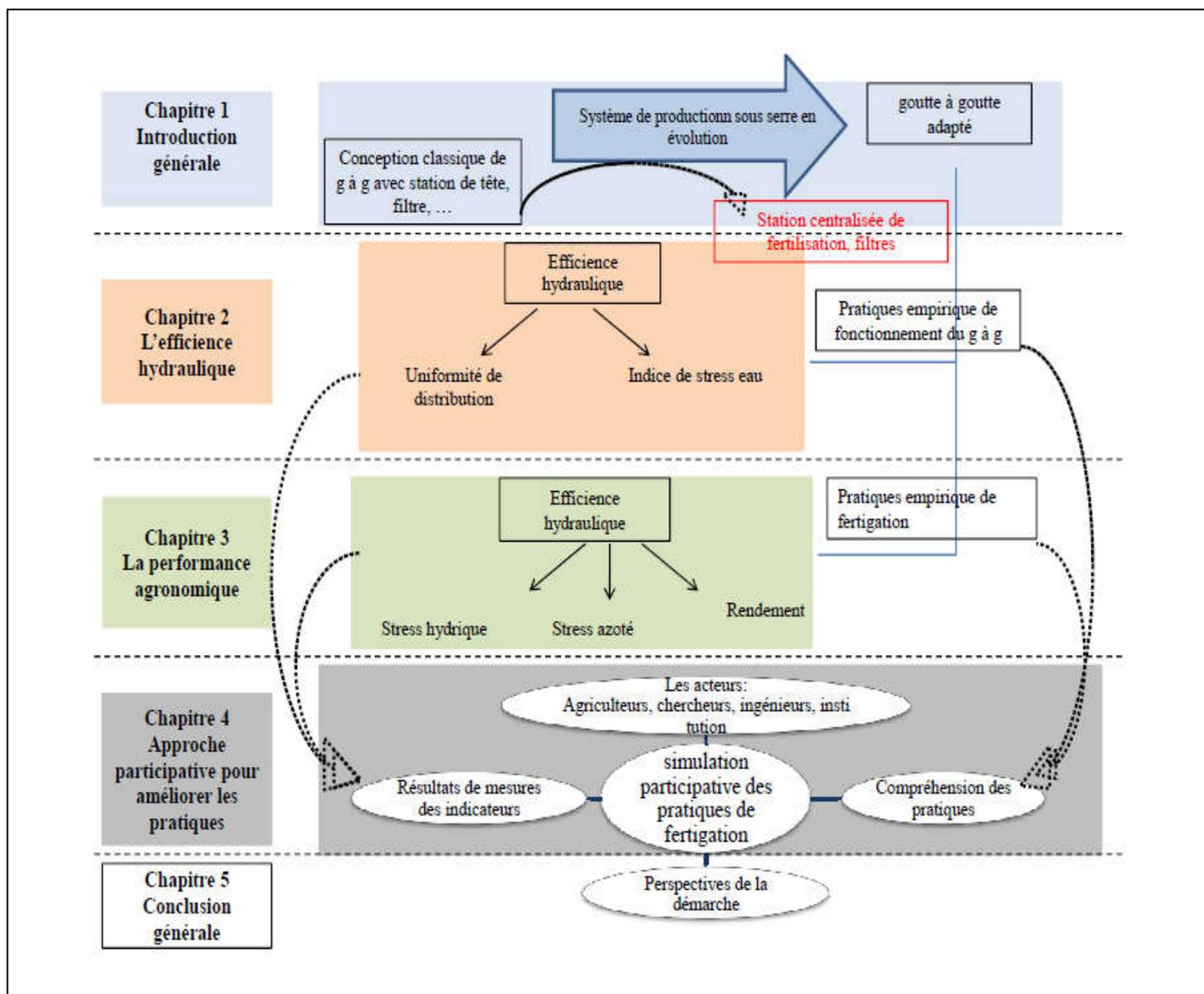


Figure 6 : Organisation de la thèse

Dans le chapitre 2 de la thèse, une analyse est faite sur le système de production en général, puis plus particulièrement sur le système de goutte à goutte sous serre. Cette opération a concerné 25 serres cultivées en piment, poivron, concombre courgette, aubergine, melon et tomate. Le choix du modèle de bilan hydrique Aquacrop est justifié par son adaptation aux cultures maraichères avec l'existence dans sa base de données des paramètres pour toutes les espèces rencontrées sur terrain. Dans ce chapitre nous expliquerons les logiques des agriculteurs en lien avec l'entretien du matériel et la gestion des irrigations à l'échelle de la serre, de la parcelle puis à une échelle de plusieurs exploitations autour d'un forage collectif. Le chapitre 3 porte sur l'analyse des performances des pratiques de fertigation d'une

quinzaine d'agriculteurs sur les rendements agricoles d'une part et sur leur impact environnemental d'autre part (pertes en eau et lessivage de l'azote. Nous y introduirons le facteur fertilisation azotée associée à l'irrigation et également la production de la culture à l'échelle de la serre. Nous nous servirons des références apportées par le modèle de culture PILOTE-N (Mailhol et al., 2018) calibré au contexte local de la zone et sur la tomate sous serre. Les résultats des deux précédents chapitres serviront de base pour une approche innovante visant l'amélioration des pratiques des agriculteurs. Dans ce chapitre 4, nous mettrons en œuvre une modélisation participative et interactive dans laquelle le modèle PILOTE-N sera comme outil de dialogue avec les agriculteurs. Cette thèse finira par une conclusion (chapitre 5) dans laquelle nous reviendrons sur la question de départ et notamment par rapport à l'importance d'impliquer les agriculteurs dans le processus de production de l'information par mesures des indicateurs, également dans le cadre de démarche participative de conseil agricole.

Chapitre 2

Evaluation de la conduite d'irrigation des agriculteurs, influence de l'accès aux facteurs de production sur les pratiques (Biskra, Algérie)

Ce chapitre a été publié sous forme d'article dans la revue *Irrigation and drainage* :

Connecting drip irrigation performance to farmers' practices: the case of greenhouse horticulture in the Algerian Sahara. Laib Khalil, Hartani Tarik, Bouarfa Sami, Kuper Marcel, Mailhol Jean-Claude. 2018. *Irrigation and Drainage*, 12 p.

<https://doi.org/10.1002/ird.2228>

Chapitre 2. Evaluation de la conduite d'irrigation des agriculteurs, influence de l'accès aux facteurs de production sur les pratiques (Biskra, Algérie)

Dans ce deuxième chapitre, nous mettons en lumière l'état actuel de la pratique d'irrigation des cultures protégées sous serres, caractéristiques de la zone d'El Ghrous (Biskra, Algérie).

Nous allons essayer à travers une démarche méthodologique de :

- Décrire et définir les types d'exploitations agricoles pratiquant la spéculacion de plasticulture, cette typologie se base sur le niveau d'accès aux différents facteurs de production.
- Décrire les profils d'agriculteurs intervenant dans l'irrigation, leurs contraintes ainsi que l'origine de leur savoir faire dans l'irrigation.
- Décrire le schéma générale de l'irrigation, c à d les différents composant du système d'irrigation caractéristique de la zone d'étude.

Une démarche méthodologique est proposée pour le volet évaluation de la performance d'irrigation, celle-ci concerne à la fois l'aspect matériel à travers l'évaluation de l'uniformité de distribution des gaines de goutte à goutte sur le terrain même (à l'intérieur des serres), et aussi la conduite de l'irrigation à travers l'évaluation du stress hydrique lié à la pratique d'irrigation de l'agriculteur.

Nous essayons dans ce chapitre d'expliquer l'influence des facteurs externes sur la décision d'irrigation, ceci constitue des logiques d'irrigation qui diffèrent en fonctions des objectifs et des logiques des agriculteurs.

2.1 Introduction

For several years, Drip irrigation has widely promoted worldwide for several years now (Postel, 1999; Venot *et al.*, 2017), and is generally considered to be one of the most efficient ways to improve water productivity of high added value horticultural crops (Luquet *et al.*, 2005). It also enables the use of fertigation to supply crops with needed nutrients (Hartz and Hochmuth, 1996) and is considered to be particularly well suited to greenhouse systems (Yuan *et al.*, 2001; Lamont, 2009).

Beyond the theoretical hydraulic performance of drip irrigation, recent studies brought out that the actual performance of drip irrigation can be quite different from the performance observed in experimental stations (Benouniche *et al.*, 2014). This is mainly due to the variety of objectives (e.g. water saving versus labour saving or versus increased yields) and constraints (partial presence on the farm, financial capacities, etc), farmers have. Likewise, irrigation performance may vary overtime and establishing a single figure for irrigation efficiency or distribution uniformity may consequently be misleading.

However, assessing drip irrigation performance in real conditions is not yet widespread and generally does not take all the farmers' objectives and the management constraints into account in a comprehensive approach (Van der Kooij *et al.*, 2013; Benouniche *et al.*, 2014). Irrigation performance depends on the technical quality of the irrigation equipment (tested in standards laboratories) but also on the farmers' irrigation and maintenance practices. Above all, clogging of emitters is a major source of problems in drip irrigation systems (Ravina *et al.*, 1992). The quality of the filter system and how often the drip irrigation tape hose is renewed may affect the uniformity of water application and hence the performance of the overall irrigation system (Oron *et al.*, 1979; Nakayama and Bucks, 1981). Furthermore, farmers may prioritize crop production (quantity and quality) over water saving once they have switched to high-value crops, and may fail to maintain their drip irrigation system (especially when they employ labourers), or may face practical problems in their irrigation practices (e.g. by judging the level of soil moisture and the state of the plant foliage visually). These different practices can lead to different irrigation schedules even for the same cropping system in the same area.

The objective of this study was to link the performance of drip irrigation systems to farmers' practices in greenhouse horticulture in the Biskra region (south-east Algeria). Our hypothesis is that the diversity of farmers' constraints greatly influences the logic of their practices and hence their irrigation performances. We considered irrigation performance as a dynamic

process, which continuously evolves due to changes in both irrigation equipment and in farmers' practices. Thirteen farmers farming in 25 horticulture greenhouses were selected based on the difference in the farmers' status (owners, share croppers, tenants), water constraints, financial conditions, and know-how. We first evaluated the distribution uniformity (DU) indicator (Karmeli and Keller, 1974) to assess the effect of clogging. The DU was measured during two periods of the year (February and April) to check variations over time and its links with the frequency of renewal of the drip irrigation tape hose. Second, we compared the theoretical irrigation scheduling calendar simulated using the Aquacrop model with farmers' actual schedules. The standard relative water supply (RWS) indicator was used and was completed by an indicator 'water stress level' (WSL) we developed to estimate the number of days under water stress during the crop cycle. Finally, we link the results to farmers' practices and constraints.

2.2 Material and methods

2.2.1 Saharan greenhouse farming

The study area is located in the Biskra administrative department (south-east Algeria). Our analysis focused on the municipality of El Ghrous, which is representative of the expanding agriculture in the region (Amichi *et al.*, 2015). El Ghrous benefits from favourable conditions: abundance of land and groundwater, a Saharan climate, which enables the production of early crops, and the existence of markets and roads, which means agricultural products can be sold to the whole country.

The agricultural boom has been stimulated by government programmes, including facilitating access to land (1983 land programme), and from 2000 onwards, by subsidies from the National Agricultural Development Programme (Khiari, 2002). Subsidies at the farm level concerned production equipment, e.g. greenhouses, water storage basins, drip irrigation equipment and, above all, access to the water resource through the tube-wells. The area is characterised by two cropping systems, in addition to the multi-tiered traditional oases: one system is focused onto the production of dates, particularly the renowned Deglet Nour variety, and the other to greenhouse horticulture, including tomatoes, sweet peppers, hot peppers, aubergines and melons. Greenhouse horticulture covers more than one thousand hectares in the municipality and is mostly practiced by sharecroppers, who have informal contracts with landowners or lessees. These (hardworking) sharecroppers often come from hundreds of kilometres away to take part in these profitable farming systems which enable relatively rapid gains (Naouri *et al.*, 2015).

The greenhouses we studied, as shown in figure7, are plastic tunnels characterised by semi-circular sidewalls (50 m long and 8-9 m wide). The arcs forming the greenhouse structure are made from galvanized iron. There is a door at each end of the tunnel (front and back) to ventilate these low-tech greenhouses. All the components of the greenhouse are manufactured locally. The majority of landowners and lessees equip their greenhouses with a drip irrigation system, which they adapted to the current farming systems, for example by simplifying the fertigation units as represented in figure1 (Naouri *et al.*, 2017). These farming systems are organized around commercial horticultural crops (tomatoes, peppers, melons, etc.) produced by sharecroppers each of whom is in charge of five to six greenhouses. The landowner or lessee generally obliges sharecroppers to use drip irrigation in order to maximize the cultivated area they can rent out. As the sharecroppers can change from one year to the next and the greenhouses may be relocated every three years due to soil fertility problems, drip irrigation systems are always low-cost with a simplified fertigation unit and low-cost tubing (20€/greenhouse). There are no filter systems, and, except for the main line, the equipment is mobile.

Access to irrigation water is through individual or - more frequently - collective tube-wells. Tube-wells range from 70 to 500 m in depth. Extraction of groundwater is ensured by electric powered vertical submersible pumps. In the case of access to collective tube-wells, each farmer receives a specific irrigation turn. Drip irrigation systems are individualized with separate water supplies; each greenhouse also has an individual simplified fertigation unit. This makes it possible to apply specific irrigation and fertigation practices in each greenhouse, and to set up specific financial accounts between the owner and the sharecropper for each individual greenhouse.



Figure 7.Type of greenhouse with its irrigation and fertigation unit

2.2.2 Irrigation practices

The aim of this study was to characterise differentiated irrigation practices, to analyse them and later to understand the farmers' logic behind their practices. The study was carried out in two stages. In the first stage, the objective was to explore drip irrigation in local conditions, and to establish criteria to select greenhouses for the survey. We visited 23 different farms. We observed the drip irrigation systems in operation, and interviewed the farmers (landowners, lessees, sharecroppers) on their irrigation practices. We identified three criteria, which – we hypothesised –influence irrigation performance: i) the status of the farmer (landowner, lessee, sharecropper); ii) access to water (individual or collective tube-well), as collective tube-wells may limit irrigation time; iii) the presence or not of perennial crops such as dates palms in addition to horticulture, as this would result in competition for irrigation water between cropping systems. We selected 13 farms well-distributed among these criteria. We observed that greenhouses belonging to the same farmer could be irrigated differently with potentially different irrigation performances. It was not rare to see two neighbouring greenhouses belonging to the same farmer that for instance had leaking tubing in one greenhouse, and (at first sight) tubing which was functioning correctly next door. Consequently, instead of selecting one greenhouse per farmer, we selected 25 greenhouses belonging to 13 farmers (Table I).

During the second stage, we conducted a performance analysis at two levels: i) the drip irrigation system; ii) the greenhouse unit. The results of this study were compared with an

analysis at farm level to understand: i) access to irrigation water, as a function of the irrigation schedule between greenhouses, in particular in the case of a collective tube-well or the presence of other cropping systems (especially date palms); ii) the logic behind farmers' irrigation practices (see Benouniche *et al.*, 2014). This was linked to their status (landowners, lessees or sharecroppers), to the relative share of greenhouse horticulture on their farm and influences, as we will show, the irrigation practices.

At the level of the drip irrigation system, the distribution uniformity was measured according to the procedure of Karmeli and Keller (1974) described below. This measurement was made twice during the cropping cycle (February and April 2013), because it was assumed that clogging would occur rapidly due to the lack of a filter system.

At the greenhouse level, irrigation schedules were established for each greenhouse through interviews with the farmers. Irrigation schedules were filled in by the farmers themselves using blank calendars, which are easy to fill in, and were displayed in each greenhouse. These schedules contained the date and duration of each application of irrigation water. Regular visits were made to make sure that the farmers were filling in the schedules correctly. In the case of collective tube-wells, the irrigation schedule is determined by the collective water turns, which is often a limiting factor for irrigation. In the case of individual tube-wells, the farmer can schedule irrigation more freely, but may be constrained by the water requirements of competing farming systems (especially date palms). An individual discharge was applied to establish the irrigation schedule for each greenhouse. This discharge was measured as described below.

Table I. Characterisation of sample farms and greenhouses

Green house	Crop	Symbol	Age	Status	Size (Nbr/ Greenhouses)	Cropping system	Access to tube-well	Working in the greenhouses
1	Aubergine	A	39	O	5	Mono	Collective	O/HS
2								
3	Cucumber	B	30	O	3	Poly	Individual	O/HS
4	Melons	C	45	T	10	Mono	Collective	T/HS
5	Aubergine	D	39	O	10	Poly	Collective	SC
6	Melons							
7	Pepper							
8	Tomato							

9	Courgette	E	45	O	13	Poly	Individual	SC
10	Aubergine							
11	Melons							
12	Courgette	F	25	T	6	Mono	Collective	T/HS
13	Melons							
14	Courgette	G	26	T	10	Mono	Collective	T/HS
15	Melons	H	28	T	11	Poly	Collective	T/HS
16	Melons	I	30	T	17	Mono	Collective	T/HS
17	Tomato							
18	Pepper	J	34	T	6	Poly	Collective	T/HS
19	Aubergine							
20	Melons							
21	Aubergine	K	30	T+SC	4 SC + 3 T	Poly	Collective	T/HS
22	Chilli pepper							
23	Tomato	L	34	T	132	Poly	Collective	SC
24	Melons							
25	Cucumber	M	40	T	10	Poly	Collective	O/HS

Legend:

O: Owner

SC: Share cropper

T: Tenant

2.2.3 Application of the AquaCrop model

We used the AquaCrop model to describe the farmers' irrigation practices. A reference irrigation calendar was established assuming that an irrigation application is triggered when 20% of the UR (useful reserve) is consumed.

The AquaCrop model is a dynamic crop-growth model developed by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) to simulate the biomass and yield response of herbaceous crops (i.e. field and vegetable crops) to water under varying management and environmental conditions (Steduto *et al.*, 2008, 2009). The model was chosen because it takes the drip irrigation technique into account. In our study, it was used to simulate a reference irrigation schedule which to be compared to the farmers' actual schedules. This comparison was quantified using the water stress indicator defined below.

Data related to the crop, the soil and initial soil moisture were collected from the field. The

daily values of the reference evapotranspiration ET_0 were calculated according to the FAO Penman-Monteith equation detailed by Allen *et al.* (1998). Air temperature and air moisture were obtained from measurements made by an electronic thermo-hygrometer installed in a nearby greenhouse. The radiation values were measured outside the greenhouses and a transmission factor was used to adapt this parameter to greenhouse conditions. We used De Villedé's (1970) transmission factor which is adapted to simple plastic simple walls and equals 0.70. Finally we assumed a zero wind speed inside the greenhouse. The corresponding annual reference evapotranspiration value inside the greenhouse was found to be 1620 mm during the 2012/2013 cropping season.

The AquaCrop model was calibrated by measuring variations in the soil moisture and in the canopy cover (CC) in one representative greenhouse. The soil moisture was measured at several periods with reference to the irrigation supplies, i.e. between two successive irrigation events at an interval of four days. The canopy cover was estimated monthly from the planting to the final stage (six times).

2.2.4 Performance indicators

Three indicators were calculated. Two standard indicators, distribution uniformity and relative water supply and one indicator proposed for this study, i.e. the water stress indicator.

a. Distribution uniformity

Drip irrigation systems are characterised by a large number of emitters per unit area (about 10 units/m²), placed over or below the soil surface (Ravina *et al.*, 1992). Performance was assessed based on discharge measured by selected emitters sampled within the irrigation unit. Selecting appropriate emitters is the key to guaranteeing that plot irrigation heterogeneity is correctly represented (Karmeli and Keller, 1974). Distribution uniformity provides information on the effect of the hydraulic design of the system, the performance of the emitters, and the effect of clogging (Tisseyre and Ducanhez, 2013). Karmeli and Keller (1974) proposed a distribution uniformity coefficient (DU), which is currently the most widely used to evaluate the uniformity of drip irrigation systems. Greenhouses in the study area contain eight drip irrigation lines that match eight rows of plants. Sixteen emitters per greenhouse were selected to measure their discharges. Four out of eight lines were selected as follows: the two edge lines plus two at the middle by skipping one line each time, then four emitters were selected on each line located at a distance of 1/3 of the total length of the drip line (50 m) from the first emitter at the entrance of the greenhouse until the last emitter

(Karmeli and Keller, 1974).

The discharge was measured by calculating the volume of water collected under the dripper in small cups (250 ml capacity) for a period of 10 minutes using a graduated burette. Distribution uniformity (DU) is not an efficiency term. To underscore this, it is recommended that DU be presented as a ratio, not a percentage (Burt *et al.*, 1997).

DU was calculated using equation (1).

$$DU = \frac{\text{Average Low Quarter Discharge}}{\text{Overall Average Discharge}} \quad (1)$$

Farmers generally have intuitive, qualitative knowledge on DU, as they can see the effect of under-irrigation in certain parts of the greenhouse on the plants. Measurements were taken in selected greenhouses (12 out of 25) during two periods of the year (February and April) to check variations in DU over time, and to assess the farmers' awareness of the state of their irrigation system.

The overall average discharge of the measured emitters in each greenhouse was used as a reference value to estimate the total discharge delivered to the entire greenhouse, by multiplying it by the total number of emitters per greenhouse.

b. Relative water supply

The relative water supply (RWS) is defined as the ratio of total water supply to the total demand at field level, and can also be used as a measurement of adequacy (Levine 1982).

RWS was calculated using equation (2).

$$RWS (\%) = 100 \% \frac{\text{Total amount of irrigation water supplied (mm)}}{\text{Theoretical crop water demand (mm)}} \quad (2)$$

This indicator was used for two purposes in this study: i) to reveal the difference in the total amount of irrigation water supplied between farmers with individual and collective access to water; ii) as an intermediate indicator from which we derived an additional indicator called the 'water stress level'.

c. Water stress level

By comparing simulated irrigation scheduling with the AquaCrop model and those observed, for each greenhouse, we determined the number of days when water storage was below the

critical threshold. The ratio between the number of days the crop suffered from water stress and the total number of cropping days of the season was defined as the water stress level indicator (WSL):

$$\text{WSL} = \frac{\text{Number of days the crop faced water stress}}{\text{Total number of days in the cropping season}} \quad (3)$$

The WSL thus represents the periods of water deficit during the vegetative cycle of the crop. It reveals how (frequency and application) the farmers irrigate their crops compared to the theoretical water requirements given by the model. To facilitate interpretation of the values of the indicator, in the rest of the paper, the (1-WSL) value will be used: when it is close to 1, the irrigation performance is assumed to be satisfactory; i.e. the crop is under no water stress.

2.3. Results

According to our field observations, the horticultural irrigation practices extend from September to June with a shift in March when the date palm irrigation starts and by coincidence, when the market price of horticultural products falls due to the competition from other production basins. This is hypothesised to have impacts on the irrigation performance through DU and (1-WSL).

2.3.1 Distribution uniformity

Two main results were obtained. First, our measurements showed relatively homogeneous DU values across our sample, as the DU values of the great majority (21 out of 25) of drip irrigation systems was between 0.5 and 0.75. Only two out of 25 drip irrigation systems had a DU greater than 0.9. In some cases, some emitters were totally clogged, in which case, the value of 0 (ml) was attributed to them. The target of 0.9 established by Karmeli and Keller (1974) thus appears very difficult to reach, and shows that for farmers, the objective value of DU ranged between 0.5 and 0.75. For the farmers whose greenhouse production is a financial priority at the farm level (rather than perennial crops like palm trees), DU values were generally higher. These farmers changed their driplines more frequently, and undertook regular maintenance. This was the case of landowners who worked in their own greenhouses, or sharecroppers who had the power of decision on when to change the driplines. Conversely, on farms where the measurements revealed low DU values, this was explained by the lack of maintenance of the irrigation system. This happened when the sharecroppers, who were handling irrigation, did not have the power of decision on when to change the driplines, or when the farmer's financial situation could not support the cost of changing the driplines twice in the same season. Interestingly, some farmers modified their irrigation practices to

minimise the clogging of emitters; they opted for covering the driplines with soil, which considerably minimises evaporation, and hence the risk of accumulation of solid deposits at the outlet of the drip emitter. Such solid deposits are of different origin, they may be solids in the irrigation water or undissolved particles of fertilizer.

Second, the results revealed rapid changes in DU values over time. In the research protocol, it was planned to measure DU twice in a certain number of drip irrigation systems, especially when the farmers changed crop. Figure 8 shows the changes in the DU of drip irrigation systems between the first measurement (February 2013) and the second measurement (April 2013) in the selected greenhouses. Surprisingly, we observed considerable changes in most DU values (Figure8), whereas only two drip irrigation systems had unchanging DU values. A decrease in the DU between the two periods, which was the case in six greenhouses, was the result of clogging of the emitters on the driplines. For instance, the DU of one drip irrigation system decreased from 0.69 to 0.49 in a period of only two months. This showed that farmers encounter problems managing their fertigation unit and also the absence of the filter system. In contrast, an increase in DU values was observed in the case of four greenhouses. For instance, in one greenhouse, the DU increased from 0.6 to 0.85. This increase occurred because the farmer renewed the driplines between the two measurement periods. In the case of a crop rotation system in the same year, the tubing is usually renewed during the transition period between two crops.

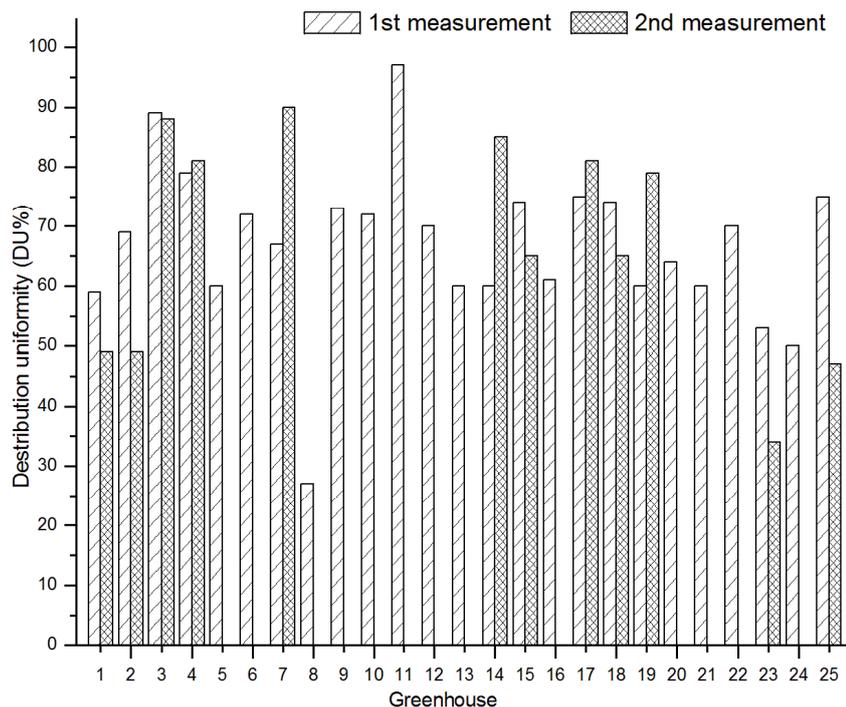


Figure 8. Variations in distribution uniformity during one cropping season in selected greenhouses

2.3.2 Relative water supply

Relative water supply (RWS) was calculated to estimate whether crop water requirements were satisfied. Two main results were obtained (Figure9). First, 22 out of 25 farmers managed to remain above 85% of the calculated relative water supply, and in most cases (14 out of 25) even reached 100% or more (i.e. the volume of irrigation water applied equals or exceeds the crop water requirements). This is due to the fact that farmers are very keen to obtain the highest possible yield. Second, there was a difference between the values obtained by farmers who depend on a collective tube-well, and those with an individual tube-well. In the case of collective tube-wells, farmers are limited by irrigation turns of fixed durations and frequencies. They cannot provide enough water, especially during the peak months when the crop water requirements exceed the water provided by a water turn. In eight greenhouses out of 14, RWS was below 100%. In the case of individual tube-wells, RWS is generally higher because farmers are generally free to irrigate at any time (eight out of 11 drip irrigation systems showed RWS values higher than 100%). Their only constraint is competition with other farming systems on the farm, especially date palms. In addition, some farmers may

under estimate crop water requirements, especially at the beginning of the season when the temperatures are not yet high. In three out of 11 drip irrigation systems, which depended on individual tube-wells, the farmers applied less water and remained closer to the crop water requirements than the other systems belonging to the same group.

There were two exceptions to these general differences between collective and individual tube-wells in their impacts on the satisfaction of the crop water requirement. In three drip irrigation systems (n3, 6, 10), which depended on individual tube-wells, the level of relative water supply was lower than 100% unlike the other systems in the same group. This was the case on farms where the farmer's priority was producing dates, at the expense of greenhouse horticulture. The second exception in the case of access to a collective tube-well were two drip irrigation systems (n12, 15) in which relative water supply values increased during the last part of the cropping season. This can be explained by the reduction in competition for water during the second part of the season, when many farmers do not use their greenhouses, as vegetables can be grown in other parts of Algeria. Farmers who remain in the area and continue to cultivate their greenhouses are consequently able to increase their irrigation applications, and in this case, their situation can be compared to farmers who have access to an individual tube-well.

Figure 9 illustrates the impact of access to irrigation water (from individual or collective tube-wells) on irrigation applications, which in turn determines relative water supply, in other words, whether or not the crop water requirements are satisfied.

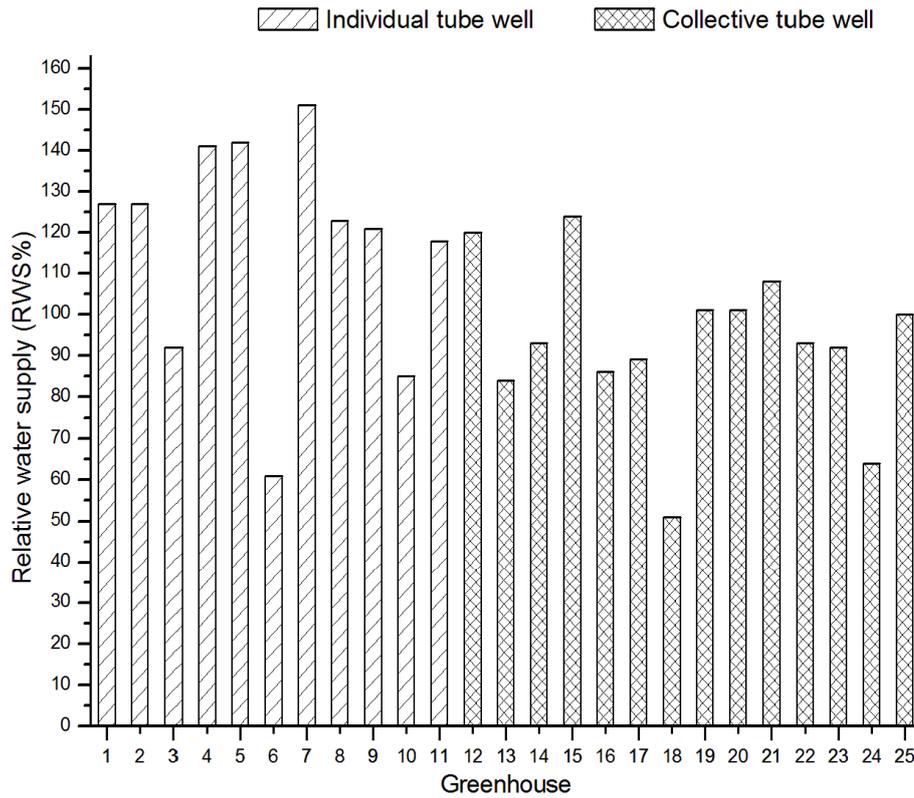


Figure 9. Relative water supply for the 25 greenhouses sampled, as influenced by access to irrigation water

However, providing a total volume of irrigation water equal to the crop water requirement does not necessarily imply good irrigation management, which also depends on the distribution of these volumes (frequency and applications) over the course of the season. To understand farmers’ irrigation practices, farmers’ irrigation schedules were analysed and compared to the theoretical schedule estimated by the AquaCrop model, which recommends an optimal irrigation schedule based on field conditions. Figure 10 shows an example of a greenhouse in which no water stress occurred during the first part of the season, but some water stress appeared from the second month on, even though the farmer over-irrigated throughout the season (RWS = 52%). This prompted us to use the notion of ‘water stress level’. The example in Figure 10 shows no stress up to mid-season, which is explained by the similarity of the farmer’s irrigation schedule (in both applications and frequencies) to the theoretical schedule provided by AquaCrop. After the mid-season (by March), the applied irrigation amount was below crop water requirements, so the stress level was higher than in the first part of the season, even though the farmer had access to an individual tube well. This

was due to the fact that this farmer gave priority to the irrigation of date palms at the expense of the greenhouse horticulture.

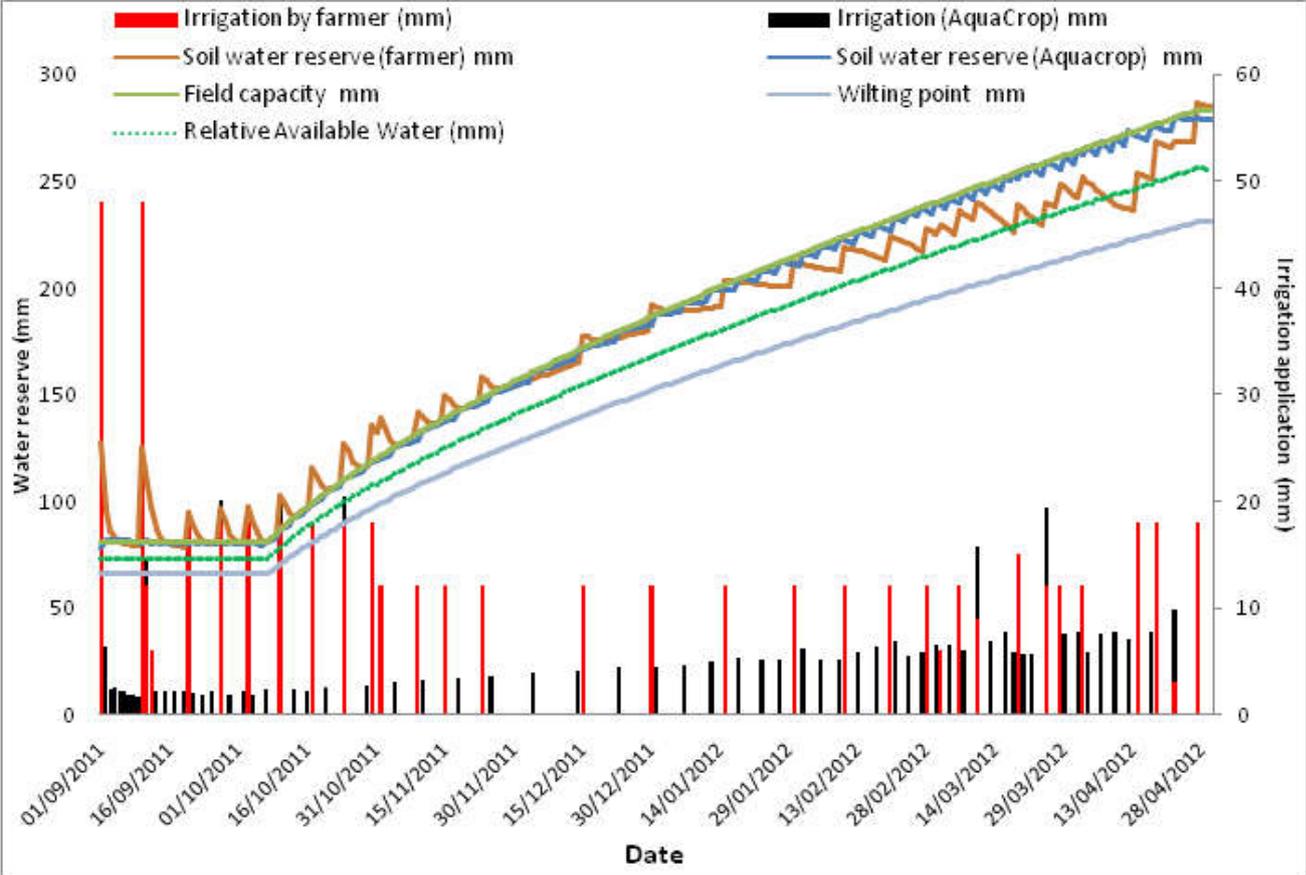


Figure 10. Comparison of one farmer’s irrigation practices with the optimum irrigation schedule proposed by AquaCrop (greenhouse n 11 of eggplants)

2.3.3 Water stress level

Water stress level is an important indicator as crops in greenhouses are very sensitive to water stress, and the commercial nature of agricultural production means that farmers are very keen to obtain good yields, by (among other factors) minimising water stress. Farmers are generally well aware of the stress level of their greenhouse. Figure 11 represents the water stress level for greenhouses.

For a better graphic representation of WSL indicators (Figure 11), the values of this last are taken as (1-WSL), in this case less is the water stress, the difference (1-WSL) is closer to 1 and highly is the performance level of the considered farmer.

Figure 11 shows the variability of the (1-WSL) indicator in the 25 sampled greenhouses. First, for nine out of 25 greenhouses, the values of (1-WSL) were higher than 0.7. These farmers were very keen to avoid water stress for their crop by providing sufficient water with the right

irrigation frequency, thereby minimising the number of days of stress (less than 0.3). This was the case of farmers who had individual access to the water resource and have good sharecroppers. Second, seven out of 25 greenhouses had values of (1-WSL) between 0.7 and 0.5. These farmers had average values of (1-WSL). In this case, greenhouse farming was not the main priority at farm level due to competition with date palm cultivation. This was particularly common during the second half of the horticultural season (by March), when the water requirements of date palms increase. This was combined with problems of clogged tubing especially in this period of the cropping season, which affected the uniformity of water distribution and consequently the water supplies, leading to a higher number of days of stress. Finally, nine out of 25 greenhouses had (1-WSL) values below 0.5. The impact of a shared access to water resource can clearly be seen in this group of farmers. In fact, farmers do encounter difficulties obtaining enough irrigation water during the peak periods, as illustrated by an increase in the numbers of days of water stress (more than 0.5).

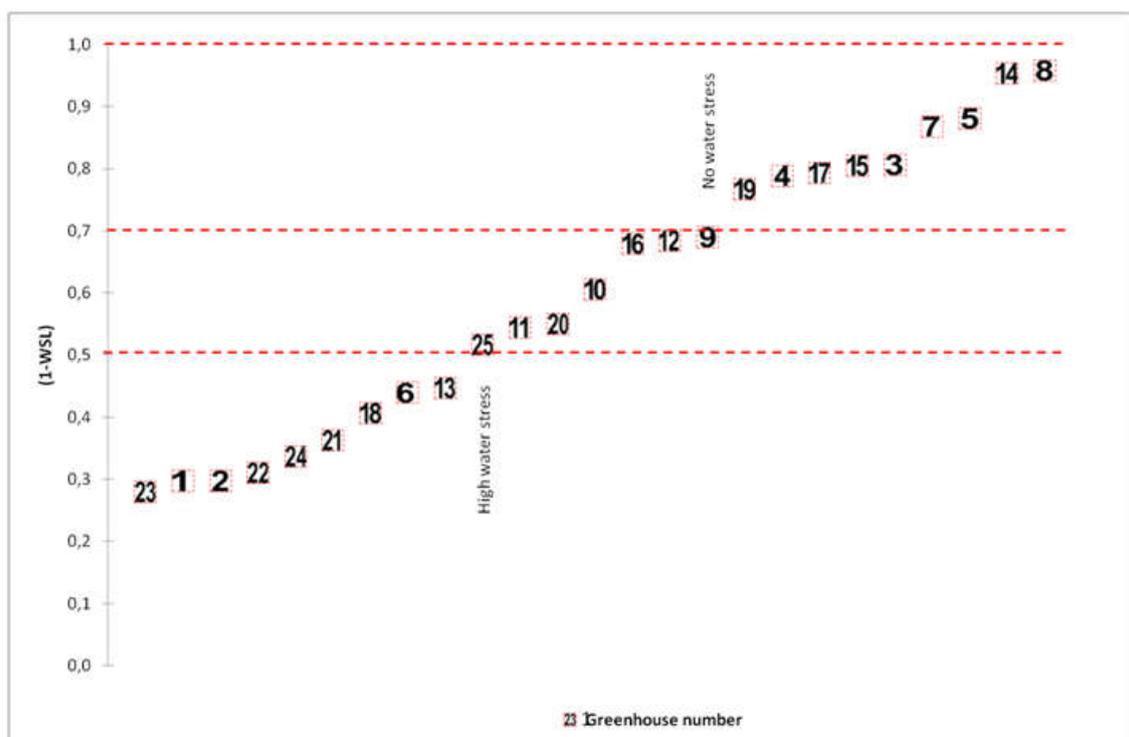


Figure 11. Variations in (1-WSL) in the sample of 25 greenhouses during the 2012/2013 cropping season

2.3.4 Explaining farmers' irrigation practices through the variability of drip irrigation performance over the cropping season

Drip irrigation classes related to the performance indicators

Three categories of drip irrigation performance were identified based on a combination of DU

and (1-WSL) (Figure 12).

Class A: $0.6 < DU < 0.8$ and $(1-WSL) > 0.7$. Seven out of 25 greenhouses are represented with high both DU and (1-WSL) values. These farmers had unrestricted access to the water resource (generally individual) and they considered the greenhouse farming as a priority at the farm level, resulting in the involvement of good sharecroppers with experience in greenhouse farming. They obtained a good level of drip irrigation performance.

Class B: $0.6 < DU < 0.8$ and $0.5 < (1-WSL) < 0.7$. Farmers in this class had shared access to the water resources. This clearly affected the irrigation performance (1-WSL) due to difficulty obtaining sufficient water during peak water requirements. This class also included seven farmers with financial constraints, which forced them to cultivate their greenhouses themselves, despite limited know how, and who did not renew clogged drip irrigation tubes. In this class, greenhouse farming was the second priority after date palm cultivation.

Class C: $DU < 0.7$ and $(1-WSL) < 0.5$. This class represents low-performing drip irrigation systems. At first sight, the profile of the farmers is contrasted. Two new young farmers had financial constraints and little experience in greenhouse horticulture (renewing the drip irrigation tubes was not feasible). One of the farmers was a large-scale investor whose greenhouses were managed by many sharecroppers with little experience. All these farmers had limited access to water resources (collective tube wells), which increased the value of WSL during the cropping season.

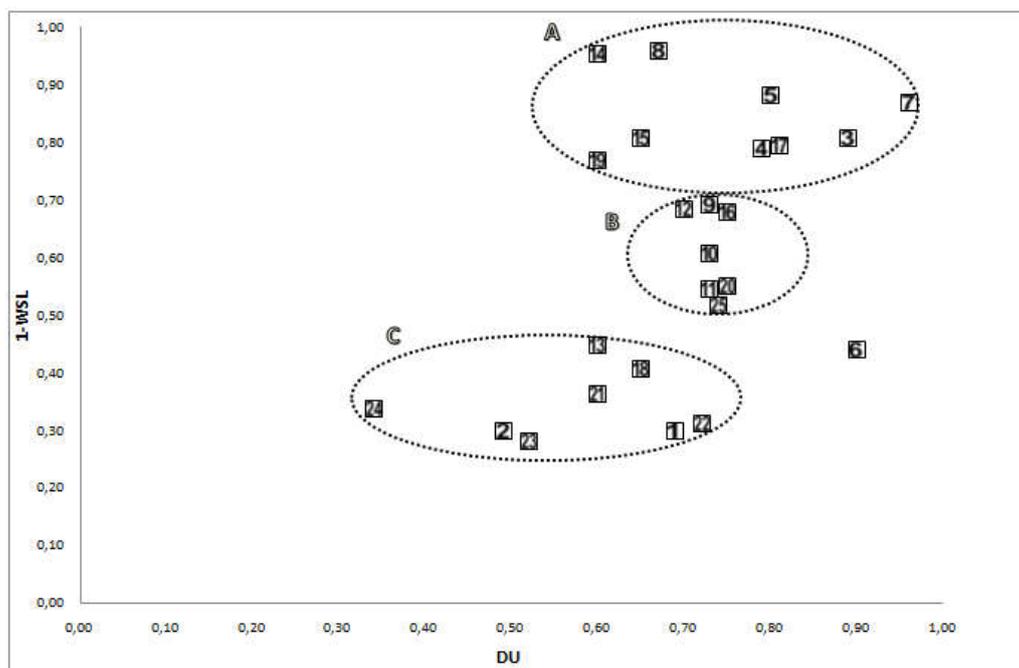


Figure12. Classification of drip irrigation performances by combining indicators

Drip irrigation performance is not static but changes over the cropping season as evidenced by DU and (1-WSL). These changes are related to: i) the farmers' perception of crop water requirements; ii) accessibility to groundwater for which many crops often compete; iii) the market prices of horticultural products, which may or may not encourage intensive irrigation; iv) some technical problems with the drip irrigation systems.

2.4 Discussion

We have shown that the field performance of drip irrigation systems, as expressed by distribution uniformity and the water stress level, is a dynamic process determined by farmers' irrigation practices. For example, we observed that the distribution uniformity (DU) of a drip irrigation system increased from 0.6 to 0.85 in the same cropping season, as farmers frequently changed their low-cost drip tubing. The DU could also decrease rapidly, for example from 0.69 to 0.49, within a period of two months. This decrease was due to the lack of filter systems and corresponded to the end of a cropping cycle. The highest value obtained for DU was 0.97, which is even higher than the objective value established by Karmeli and Keller (1974). However, most drip irrigation systems (21/25) had DU values between 0.50 and 0.75. Farmers intentionally maintained DU values within this range to avoid water stress when they only had limited access to water through collective tube wells. We also observed farmers who used different irrigation practices for different crops, for instance by favouring (profitable) hot peppers over (less profitable) aubergines, or changing practices during the season, when water availability changed. This is a good indicator of the farmers' understanding and perception of how irrigation performance is constructed: they irrigate more to compensate for a low value of distribution uniformity, or they renew their drip irrigation tubing (thereby improving DU) to make better use of a limited water share. Analysing irrigation performance thus requires a good understanding of farmers' irrigation practices as well as the underlying logic of these practices, as advocated by authors like Tanji and Keyes (2002), Luquet *et al.* (2005), and Benouniche *et al.* (2014). Research on drip irrigation performance assessment has proposed many indicators, however the originality of our approach is that it combines a technical and social indicator (Legrusse *et al.*, 2009). DU and water stress level refer to different concepts which enable better evaluation of irrigation performance.

Moreover, we go one step further by showing that farmers integrated irrigation performance indicators including the concept of DU and (1-WSL) in their irrigation practices. This can be explained by the fact that both indicators have visible effects on crop production and on the

commercial nature of greenhouse horticulture, which makes farmers very alert to water stress, and to the need for homogenous distribution of water in the greenhouse. Inversely, an indicator such as relative water supply (RWS), which is generally at the heart of classical performance assessment is of no direct interest to farmers, and has consequently not been incorporated in their irrigation practices. We show that RWS is useful in that it reveals the general 'water comfort status' of particular greenhouses (with individual or collective access to irrigation water), but we also show that an average value of RWS over the cropping season was not sufficient to capture a continuously changing irrigation performance. This was the case, for example, of a farmer who, calculated over the entire season, over-irrigated by 20%, but who under-irrigated at certain periods of the season, thereby negatively influencing crop yields. In this particular case, we counted 88 days of water stress over the cropping season, particularly during the second part of the season. For these reasons, we propose a cumulative water stress level indicator to account for the intra-seasonal water stress. The measurement of performance indicators in a sample of 25 greenhouses owned by 13 farmers revealed three different levels of drip irrigation performance, each with specific achievements in terms of distribution uniformity and water stress. We showed that some farmers achieved the same level of performance in different greenhouses, whereas other farmers deliberately chose different performance classes for their greenhouses.

We identified the driving factors behind these different irrigation practices with four main drivers: i) access to water resources: shared access to collective tube wells versus individual tube wells, led to critical water stress during some parts of the season, as farmers could not provide sufficient water to meet theoretical crop water requirements; ii) competition between crops for water; this was especially the case when date palms were irrigated from March onwards; iii) the relative financial weight of greenhouses on a given farm; high performance levels were achieved by farmers whose only source of income was greenhouse horticulture; farmers tried harder to achieve uniform distribution to increase their economic performance; iv) the influence of market prices on farmers' irrigation practices in a highly competitive agricultural sector; decreasing drip irrigation performance levels was generally linked to a decrease in the economic profitability of a crop (a drop in market prices). This was associated with the specific conditions of these farming systems in which the financial and economic aspects play a determining role. Most sharecroppers working in greenhouses came from far away, and want to end the season with high financial rewards.

2.5 Conclusion

Based on a survey of greenhouse horticulture in south-east Algeria, we conclude that the actual irrigation performance of drip irrigation systems in the field changes continuously, and differs significantly from theoretical objectives cited in the literature. We showed how farmers implicitly use irrigation performance indicators (distribution uniformity and the water stress level) in their irrigation practices to avoid adverse effects of water stress on crop production. We propose a methodology based on the analysis of irrigation practices to explain drip irrigation performance on the one hand and to understand the factors which drive these irrigation practices, and are mainly linked to the farmers' logic, on the other hand. Our work has wider implications for policy making and planning, such as evaluating the impact of drip irrigation subsidy schemes on water saving, or up-scaling the actual use of irrigation water to higher levels, in particular to the water basin level. Simply measuring drip irrigation performance from time to time will not suffice, unless it is accompanied by a broader understanding of the farming systems in which drip irrigation is used. An ongoing study, which is a continuation of the present research, aims to improve the performance of drip irrigation, by creating a referential of fertigation practices through a participatory approach in collaboration with the farmers.

Chapitre 3

Analyse combinée des pratiques de fertigation (irrigation & fertilisation) des agriculteurs ; se servir de la modélisation (Pilote-N) pour expliquer les pertes de rendement liés au stress.

Chapitre 3 : Analyse des pratiques de fertigation au moyen du modèle Pilote-N pour expliquer les pertes de rendement dues aux stress liés à l'eau et l'azote.

3.1 Introduction

Le climat aride de la zone d'El Ghrous est favorable à la production de primeurs irriguées sous serre, la culture phare étant la tomate. Les agriculteurs de cette zone cultivent sous des serres tunnels la tomate dans une période propice en puisant l'eau de la nappe. Les pratiques culturales menées, notamment l'irrigation et la fertilisation, influencent directement la production sous serre. Ce chapitre se propose d'évaluer les pratiques de fertigation des agriculteurs à travers l'analyse des stress de type abiotique résultant de ces pratiques. On supposera donc que le traitement contre les maladies se fait convenablement. Le lien 'pratique – rendement' constitue l'identité de l'agriculteur, cette identité est conditionnée par son niveau d'accès à l'eau et aux intrants. L'accès aux facteurs de production est limité par des contraintes qui sont d'ordre 1) technique : fonctionnement du goutte à goutte low-cost, 2) économique : capacité financière, fluctuation des prix dans le marché, 3) social : contrat social et accès aux intrants chez les grainetiers et 4) organisationnel : accès à l'eau de type collectif ou individuel. Cette situation engendre des comportements variables donnant lieu à des pratiques de fertigation diverses et par conséquent des rendements dont la variabilité peut atteindre les 40 %.

Pourquoi s'intéresser à la fertigation, après avoir au préalable étudié l'irrigation ?

Dans des sols qualifiés de pauvres en éléments minéraux essentiels pour le développement et la production des cultures maraichères, une bonne maîtrise de la fertilisation est tout aussi nécessaire que celle de l'irrigation. L'évaluation de la performance des irrigations ne doit pas se limiter au diagnostic du matériel propre à la technique mais aussi à la stratégie ou à la conduite des arrosages. C'est cet ensemble qui caractérise la réelle performance de la pratique de l'agriculteur. L'efficacité agronomique est le critère qui pourrait être utilisé pour caractériser ou catégoriser un agriculteur dans ce système de production.

L'écart de rendement entre agriculteurs peut s'expliquer par des scénarios différents d'irrigation. Cependant, des agriculteurs ayant des irrigations similaires en termes de doses et de fréquence d'apports (un groupe ayant le même tour d'eau), peuvent avoir des rendements très différents. Cette différence pourrait s'expliquer par des conduites différentes de fertilisation. Ceci implique que l'évaluation de la performance d'irrigation doit être associée à une évaluation de la pratique de fertilisation afin de mieux comprendre l'écart de production

d'un agriculteur à l'autre. De plus, l'emploi excessif d'engrais, outre qu'il est préjudiciable au revenu de l'agriculteur, est une source de pollution de la nappe phréatique. Ceci constitue la dimension environnementale de ce travail de recherche.

En s'exprimant sur sa pratique d'irrigation, l'agriculteur associait les apports de l'eau à ceux de l'azote. Dans la logique de l'agriculteur, ces deux composants ensemble conditionnent la réussite de la saison culturale. La stratégie de fertilisation conditionne la production. Cependant, des erreurs de timing (eau et/ou azote apportés au moment inopportun) peuvent engendrer des pertes de rendement et/ou des reliquats d'azote en fin de cycle.

La gestion de l'eau et des engrais est conditionnée par le niveau d'accès à ces deux facteurs par l'agriculteur. Les limites d'accès à l'eau et à l'engrais ne sont pas forcément les mêmes pour chaque agriculteur. Pour les irrigations, c'est en particulier dans les forages à usage collectifs qu'on peut être limité par un tour d'eau fixe dans la durée et la fréquence. Pour les engrais, c'est la capacité financière ou la capacité d'établir un contrat social de vente sur crédit des intrants, y compris l'engrais, qui définissent le budget à allouer à la fertilisation.

L'utilisation de modèles de cultures pour piloter les irrigations peut être considérée comme une innovation. On ne néglige néanmoins pas la valeur ajoutée en matière de compréhension des pratiques des agriculteurs. Grâce à la modélisation on peut ainsi évaluer la pratique réelle de l'irrigation.

La gestion optimale du couple eau-azote est un sérieux défi aujourd'hui dans les contextes agricoles concernés par de fortes réductions d'intrants (Agostini et al., 2010). Dans le but d'évaluer les pratiques culturales liées à la gestion de l'eau et de l'azote, la modélisation est un recours intéressant. Le modèle que nous avons choisi dans le cas de notre étude est le modèle de culture PILOTE-N (Mailhol et al., 2018). Ce modèle a été choisi en raison de son caractère opérationnel. Il est en effet facile à calibrer du fait de son nombre réduits de paramètres. C'est un avantage majeur par rapport aux autres modèles quand on dispose de peu de données.

Dans ce chapitre, nous allons évaluer les performances de la fertigation ou plus précisément la productivité des pratiques émergentes des logiques d'irrigation et de fertilisation des agriculteurs, avec prise en compte des contraintes et logiques des uns et des autres (évaluation sociotechnique des pratiques). La finalité est de proposer une amélioration des pratiques culturales dans un contexte de contraintes bien défini.

Les résultats de ce travail sont à valoriser par leur implication dans une approche de conseil agricole.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Présentation de l'échantillon

Dans ce chapitre, et afin d'évaluer la performance des pratiques de fertigation des agriculteurs, un échantillon de douze agriculteurs a fait l'objet de mesures et d'analyses détaillées des pratiques. Sur l'ensemble des 23 agriculteurs suivis dans le chapitre précédent, nous avons maintenu 4 agriculteurs, avec l'ajout d'autres agriculteurs faisant partie des mêmes types d'acteurs déjà identifiés dans le même chapitre. Ceci est causé par la mobilité des exploitations de plasticulture, notamment pour les locataires, qui cherchent en permanence des nouvelles terres pour s'installer. Ceci a rendu difficile, voire impossible, de maintenir les mêmes agriculteurs pour une analyse étalée sur quelques années. De plus, et en partant d'une analyse des pratiques sur un système de production pluri cultural (chapitre 2), nous avons opté dans ce chapitre de se concentrer sur la culture phare de la tomate sous serre, ceci était argumenté par le fait de ne pas avoir une signification si on mène un approche comparative sur la productivité de l'eau et l'azote pour des cultures différentes. Sur cette culture, et de part la nature minutieuse du suivi des pratiques de fertigation effectué, nous nous sommes limités à douze agriculteurs chez lesquels toutes les données nécessaires pour conduire les simulations étaient disponibles.

3.2.2 suivi des pratiques de fertigation, implication des agriculteurs

Dans ce chapitre nous avons conduit, en collaboration avec les agriculteurs mêmes, un suivi des pratiques de fertigation sur la culture de la tomate sous serre. Le suivi a concerné douze agriculteurs de la commune d'El Ghrous durant la campagne agricole 2015/2016.

Au cours du cycle de la tomate, la pratique de fertigation des agriculteurs a été transcrite, par eux-mêmes, sur des tableaux (voir annexe 1). Pour les irrigations, les apports d'eau étaient exprimés en heures d'irrigation, pour la fertilisation, les apports d'engrais (déterminé par sa composition en Azote, Phosphore et Potassium) étaient exprimés en kilogramme par serre. Cette représentation constitue un premier niveau de travail méthodologique. Il faut signaler que les unités des grandeurs exprimées reflétaient à ce que maîtrise l'agriculteur dans ses pratiques quotidiennes. Dans un deuxième temps, et en partant des calendriers remplis, nous avons effectué des conversions sur les apports, ceci pour passer aux grandeurs physiques

universelles, c'est-à-dire : la dose d'irrigation en millimètre et de l'engrais (l'azote) en kilogrammes par hectare.

D'après le calcul des incertitudes (voir annexe 2), et sur la base d'hypothèses émises dans le chapitre 2 par rapport à la manière dont on apporte l'eau et de l'engrais, les doses des irrigations sont estimées avec une incertitude de $\pm 7,3 \%$. Pour la fertilisation, l'incertitude est de l'ordre de $\pm 10\%$. Dans notre cas, le calcul d'incertitude a pour objectif de situer les résultats trouvés dans une marge de crédibilité. Les résultats exploités lors des simulations ont été utilisés en valeurs brutes sans considérer l'incertitude.

3.2.3 Evaluation de la conduite de fertigation au moyen du modèle PILOTE-N, résultat du calage du modèle PILOTE-N

Afin de mobiliser le modèle PILOTE-N dans l'évaluation de la conduite d'irrigation et de fertilisation des agriculteurs, nous avons effectué un calage des paramètres : 'indice foliaire (Leaf Area Index, LAI)', sur un traitement supposé exempt de stress abiotique.

Pour les autres paramètres, on a eu recours à la bibliographie, notamment pour ceux liés à la demande en eau (somme des températures entre les différents stades du cycle, effet du stress hydrique sur LAI, ...) et concernant l'azote (besoins d'azote, effet de stress azoté sur l'indice de récolte, le LAI et la matière sèche totale, paramètres de la courbe de dilution,). Notons que concernant la minéralisation de l'azote du sol et la dénitrification, aucune modification n'a été faite concernant les paramètres internes au modèle.

En plus des paramètres évoqués, les données relatives à la densité de plantation et aussi aux dates du cycle cultural à savoir la plantation, le début de récolte, et la fin de récolte ont été recueillis directement à travers les enquêtes de terrain.

a. Indice de surface foliaire (LAI)

Suite à une série de mesures de l'indice indice foliaire LAI réalisées chez l'agriculteur 4, les paramètres de forme de la logistique du LAI ont été calés. La figure 13 donne une représentation satisfaisante de la simulation du LAI sur la base d'un scénario de fertigation du même agriculteur.

Etant donné l'importance du LAI dans la détermination de la demande en eau de la culture, on s'autorise à considérer qu'une bonne simulation de cet indice est de bons augures pour simuler avec confiance le bilan hydrique et azoté (Mailhol et al., 2018).

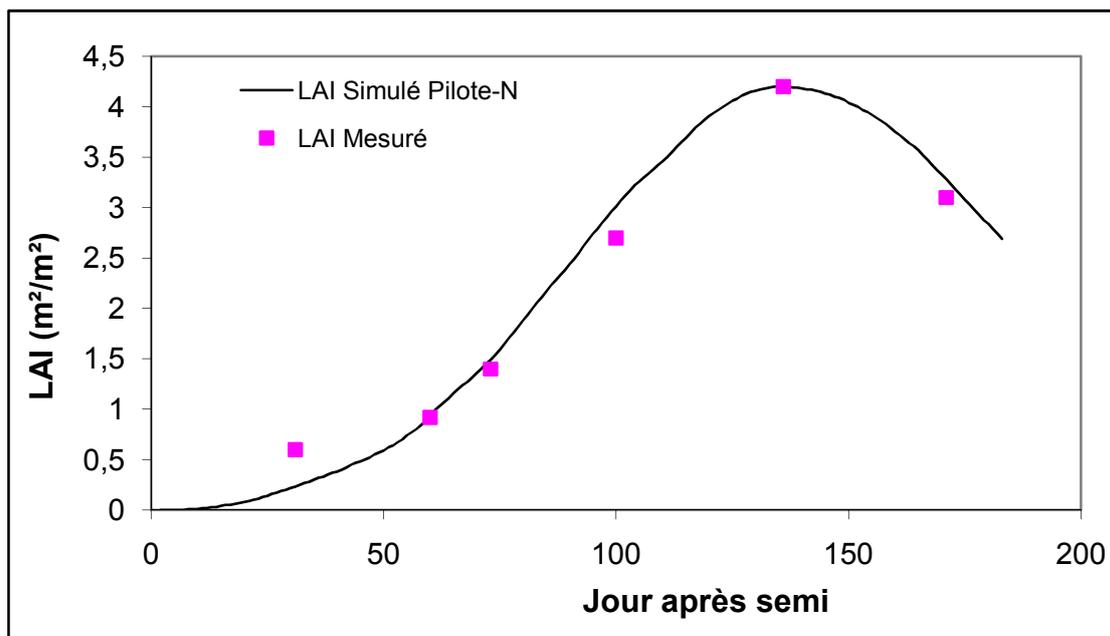


Figure 13 : Comparaison de l'évolution des valeurs de LAI entre les mesures de terrain et la simulation par PILOTE-N chez l'agriculteur 4

b. Comparaison des résultats des simulations des rendements par le modèle Pilote avec les rendements observés

Il convient au préalable de préciser que certaines données fondamentales nécessaires au bon calage du modèle sont inexistantes. Il en est ainsi du stock initial d'azote dans le sol avant plantation et à la récolte mais aussi de la teneur en azote dans la plante entière. Cela dit, l'objectif majeur étant de comparer les résultats obtenus à ceux de terrain en terme de rendement, nous avons fait l'hypothèse que ce stock initial était le même pour chaque agriculteur. Nous l'avons fixé à 60 Kg/ha ce qui correspond aux ordres de grandeur du stock initial pour une culture légumière moyenne sous serre (Bruno et al., 1 994)..

Après avoir utilisé les paramètres calés selon les paramètres exposés ci-dessus, nous avons effectué un premier jeu de simulations. Les résultats obtenus sur les données des agriculteurs les plus performants ont fourni un rendement simulé significativement inférieur au rendement obtenu par l'agriculteur (95 T/ha contre 110 T/ha). Nous avons en conséquence fait des réajustements sur les paramètres suivants : RUE (augmentée de 10%) ou encore le paramètre Ka (+15%) pour satisfaire à la fois le rendement et la teneur en azote de la tomate de l'agriculteur le plus performant.

La figure 14 présente le résultat de la comparaison entre valeurs observées et simulées des rendements en Tonnes par hectare. Chaque point du graphique représente un

agriculteur caractérisé par sa gestion à la fois de l'eau et de l'azote. La projection de chacun des points sur l'axe des abscisses correspond au rendement réel observé chez l'agriculteur considéré, sur les ordonnées, il s'agit du rendement simulé par le modèle PILOTE-N.

Nous constatons après avoir dessiné la bissectrice que pour des valeurs de rendement comprise entre 55 et 110 tonnes /hectare, le nuage de point s'aligne sur une droite avec un coefficient de détermination assez satisfaisant ($R^2 = 0,83$). Le calcul des paramètres de précision à savoir le MBE (The mean bias error) et RMSE (The root mean square error) dont les valeurs sont respectivement -0,04 et 0,1 montre que le modèle simule bien les rendements de la tomate sous serre avec une légère sous estimation que nous considérons très satisfaisante vu le manque de quelques données nécessaire au calage du modèle. De ce fait, nous concluons que le modèle PILOTE-N est à la fois calé et validé au contexte local pour la culture de tomate sous serres. Il pourra donc être utilisé comme un outil de diagnostic et de conseil auprès des agriculteurs.

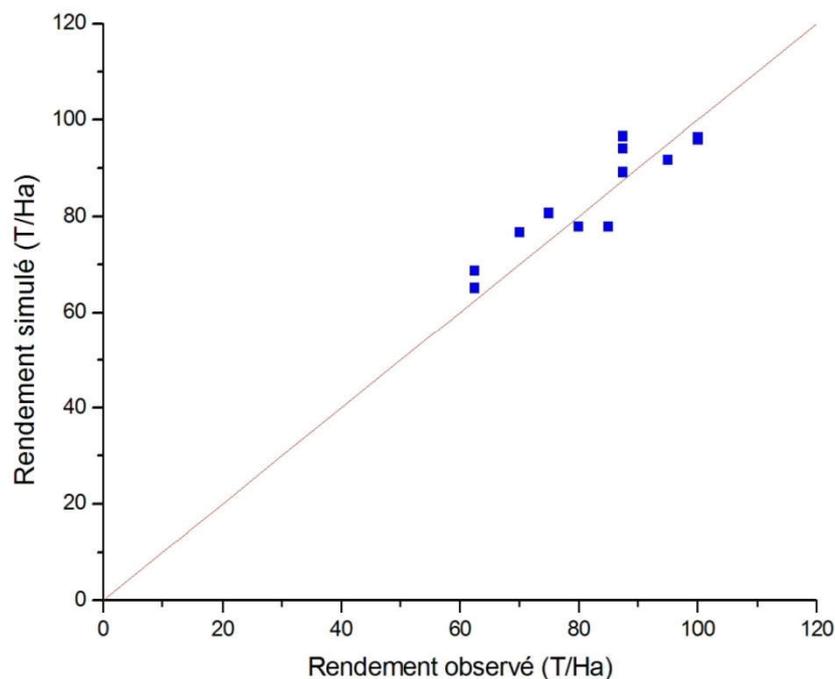


Figure 14 : Comparaison des rendements observés et simulés avec PILOTE-N pour les douze agriculteurs suivis

3.2.4 Indicateurs de performance

En plus des valeurs de rendement, le modèle met à notre disposition un bilan hydrique pour chaque pratique simulée de fertigation. Plusieurs indicateurs peuvent être mis en évidence à partir de l'analyse des bilans hydriques. Pour notre cas, et afin de montrer l'effet de la pratique de fertigation sur le rendement, deux indicateurs sont utilisés. Un premier est en liaison avec la demande en eau et l'irrigation apportée, un deuxième avec la demande en azote et l'apport par fertilisation.

3.2.4.1 Indicateurs de performance agronomique : lier les pertes de rendements à des stress abiotiques

a. Définition des indicateurs de stress hydrique et de stress azoté

Pour représenter le stress hydriques nous avons utilisé la même approche que celle utilisée au chapitre précédent où nous avons mobilisé le modèle Aquacrop. Le stress hydrique représente le rapport des valeurs journalières de l'évapotranspiration réelle à l'évapotranspiration maximale : (ETR/ETM) le long du cycle culturale d'une culture donnée. Au cours de ce cycle, la période durant le rapport (ETR/ETM) est inférieur à un correspond à une phase de stress hydrique causé par l'insuffisance de l'eau disponible pour répondre à la demande en eau de la culture (ETM).

Afin de proposer une représentation graphique qui montre l'évolution de cet indicateur, nous avons réalisé deux simulations pour un même agriculteur en utilisant PILOTE-N déconnecté de sa fonction azote. Dans un premier scénario, nous avons considéré que l'eau et l'azote n'étaient pas des facteurs limitant. C'est-à-dire que la plante était en confort hydrique (et même azoté comme la fonction azote est déconnecté du modèle dans ce premier scénario). Dans un deuxième scénario, nous avons considéré la vraie pratique de l'agriculteur. C'est-à-dire la pratique de fertigation avec la prise en compte de la composante azote dans le modèle. Suivant les résultats des deux scénarios, nous avons établi un rapport entre les valeurs journalières de l'évapotranspiration réelle résultant de la pratique de fertigation de l'agriculteur (scénario 2), et les valeurs journalière de l'évapotranspiration maximale que l'on peut avoir si la plante se trouve dans un confort hydrique (scénario 1). Les résultats du rapport (ETR/ETR optimal) inférieurs à 1 correspondent à des journées de stress hydrique. Cet indicateur représente le nombre de jours au cours du cycle ou la culture se trouve en stress. Comme pour la représentation effectuée au chapitre précédent sur l'efficacité hydraulique,

nous choisissons de représenter cette valeur sous la forme de l'indicateur (1-stress Eau). Ainsi une valeur de 1 correspond à une situation non stressée.

Le stress azoté est à son tour défini comme le rapport entre l'azote absorbé par la plante au jour J et sa demande potentielle du même jour, cette dernière étant directement déduite de la fonction impliquant les paramètres x_1 et x_2 . Cet indicateur est généré par le modèle PILOTE-N connecté à sa fonction azote sur la base du calendrier de l'agriculteur (scénario3).

Pour la représentation graphique de l'indicateur de stress azoté, nous choisissons, de même que pour le stress en eau, de représenter cette valeur sous la forme de l'indicateur (1-stress azote). Ainsi la valeur une 1 correspond à une situation non stressée.

Nous avons réalisé les trois scénarios sus définis pour les douze agriculteurs suivis sur le terrain, après écartement de l'agriculteur (5) dont le calage n'a pas était satisfaisant.

3.2.4.2 Optimisation des pratiques de fertigation par diminution des pertes d'eau et d'azote

Outre les deux indicateurs de stress d'eau et d'azote mobilisés pour évaluer la performance agronomique des agriculteurs, nous avons exploité un autre type de résultat pouvant être fourni par le modèle PILOTE-N. A l'issue de la simulation d'un scénario de fertigation d'un agriculteur donné, le modèle fourni un fichier sortie 'Résultat.txt' (annexe 3). En plus du volume d'eau apporté par irrigation, de la quantité d'azote apporté par fertilisation et le rendement obtenu, nous pouvons lire le volume d'eau perdu par drainage. De même pour l'eau, les trois formes de perte d'azote sont exprimées en Kilogramme par hectare dans ledit fichier à savoir : La perte par lixiviation, par volatilisation et par dénitrification (annexe 4 : cycle de l'azote dans le sol) (Barakat et al., 2016).

L'exploitation de ce type de donnée permet, et en complément des deux indicateurs de stress cités plus haut, d'analyser les apports en excès chez les différents agriculteurs afin de mieux qualifier leurs pratiques de fertigation. Cette approche permettra également de jeter les bases d'un protocole d'évaluation et d'amélioration des pratiques de fertigation par une approche participative de conseil agricole dans le prochain chapitre de la thèse, ceci en mettant l'accent sur les volumes d'eau et la quantité d'engrais pouvant êtres économisées.

3.3 Résultats

3.3.1 Utilisation, de l'eau et de l'azote par la tomate sous serre, résultat comparatif entre les agriculteurs

Comment les agriculteurs conduisent l'irrigation et la fertilisation de leur culture de tomates sous serre ?

Sur notre terrain d'étude d'El Ghrous, la plantation de la tomate sous serre commence au début du mois de Septembre de chaque année, son cycle culturale s'étend jusqu'à mi Mars. Pendant cette période, la demande en eau et en éléments minéraux suit la courbe de croissance de la culture à l'image du LAI. La consommation en eau peut atteindre des valeurs comprises, entre 500mm et 700mm à la demande climatique (Laib et al., 2018). Quant à l'azote, les besoins potentiels sont de l'ordre de 180 kg/ha selon les variétés (Hartz et al., 1996). Les consommations réelles vont dépendre de l'apport du sol à savoir les conditions initiales de la matière organique et de la minéralisation de l'humus, celle-ci est variable en fonction de nombreuses critères à savoir le précédent cultural, propriétés physico-chimique du sol, nature de fumier de fond.

Au niveau du contexte local, aucun dispositif de pilotage des irrigations et de fertilisation n'est mis en place afin d'indiquer le programme de fertigation à suivre. Pour se faire, les agriculteurs estiment la demande en eau de la plante en se basant sur l'état des températures journalières aussi et de l'état de leur feuillage (estimation visuelle des effets), tout en respectant (dans le cas d'un accès collectif à la ressource d'eau) le tour d'irrigation préalablement établi. Pour les fertilisants en général et l'azote en particulier, l'agriculteur se base sur les connaissances acquises selon sa propre expérience et celle des voisins. Ils s'inspirent également des conseils que fournissent, au moment de la vente de l'engrais, les "vendeurs intrants" reconnus sous le nom de grainetier (Naouri et al, 2015). A leur tour, ces grainetiers disposent de calendriers standardisés de fertilisation qui montrent une distribution simplifiée des quantités d'engrais, d'une composition donnée en éléments essentiels N-P-K, le long du cycle cultural de la tomate. Ces calendriers contiennent des compositions d'engrais à apporter, en termes de quantités et de fréquence. Les compositions en N-P-K dépendent des marques commerciales proposées par des firmes d'intrants aux grainetiers, puis aux agriculteurs. Ces compositions ne sont pas, dans tout les cas, adaptées aux propriétés physico-chimiques des sols sur lesquels l'engrais va être appliqué.

Nous allons montrer les résultats d'un suivi des pratiques de fertigation mené sur terrain lors de la campagne agricole (2015-2016).

La figure 15 représente les quantités totales apportées en eau et en azote pour les douze agriculteurs suivis.

Pour l'irrigation, les valeurs se situaient entre 430 mm et 800 mm. Onze agriculteurs sur douze ont fourni jusqu'à 500 mm d'eau d'irrigation, soit approximativement la valeur théorique des besoins en eau de la tomate en serre.

En ce qui concerne la fertilisation, les quantités sont d'environ 100 kg/ ha à l'exception des agriculteurs 1 et 7 qui ont fourni respectivement de 250 et 300 kg / ha.

Au regard des premiers résultats, les agriculteurs font preuve, à travers leurs pratiques d'irrigation et de fertilisation, d'une gestion assez satisfaisante des apports de ces deux composants. Cela résulte du fait que les quantités apportées restent au voisinage des besoins théoriques.

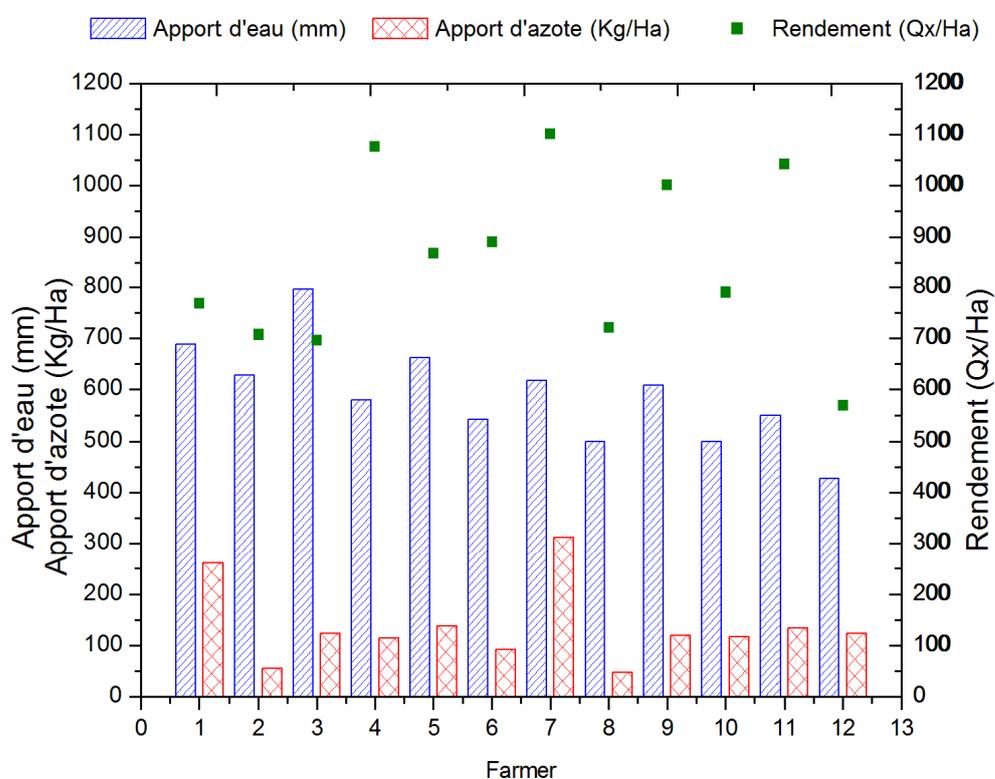


Figure 15 : Apport d'eau et d'azote (engrais) pour la culture de tomate sous serre entre septembre 2015 et Mars 2016, cas de douze agriculteurs

Néanmoins, l'introduction du composant rendement dans le processus d'évaluation permettra de mieux analyser le niveau de maîtrise des pratiques des agriculteurs.

La conduite de fertigation des douze agriculteurs a permis d'atteindre des productions à l'hectare variant de 55 à 115 Tonnes par hectare, unité que nous utilisons dans la modélisation, soit l'équivalent de 22 à 44 Quintaux par serre (unité habituelle utilisée par les

agriculteurs). Cette grande variation de rendement ne reflète pas les différences enregistrées dans les quantités apportées d'eau et d'azote. Quelques cas de figures peuvent être remarqués à savoir :

L'agriculteur 4, pour un apport de 580 mm d'eau et 194Kg/ha d'azote, il a cumulé une production à l'hectare de plus de 107 Tonnes, contrairement à l'agriculteur 3, qui pour des apports de 796 mm et 203 Kg/ha, en eau et azote respectivement, a produit près de 70 Tonnes/hectare.

Une troisième situation intermédiaire est illustrée par l'agriculteur 6 qui a apporté 543mm et 172 Kg/ha et a produit 89 Tonnes par hectare de tomate.

Dans le but de montrer les effets des pratiques des agriculteurs sur les rendements, nous nous sommes appuyés sur le modèle de culture Pilote-N.

3.3.2 La modélisation pour analyser les impacts des stress hydriques et azotés

Dans le but de représenter le résultat de l'analyse des pratiques de fertigation des agriculteurs, nous avons mobilisé les deux indicateurs de stress abiotique déjà expliqués en méthodologie. La figure 16 représente les classes des agriculteurs en fonction de l'intensité de stress en eau et en azote. Pour des raisons de représentativité graphique, les deux indicateurs ont été présentés sous la forme (1-stress). Dans ce cas, plus la valeur sur le graphique est importante, moins le stress est élevé.

A travers la combinaison des valeurs de stress en eau et en azote des douze agriculteurs, nous distinguons trois groupes représentés par des couleurs différentes (figure 16)

Le premier groupe représenté en couleur vert correspond aux quatre agriculteurs qui ont obtenu les meilleurs rendements. Ces derniers sont compris entre 100 et 110 Tonnes/ha (voir légende de la figure 16). Ces meilleures valeurs de rendement sont le résultat des pratiques optimales de fertigation opérées par ces agriculteurs. Dans notre échantillon, ce sont des agriculteurs qui exercent depuis plusieurs années dans la production des tomates sous serres.

Les zones 2 et 3 correspondent à des valeurs sous-optimales de rendement. Ces valeurs sont le résultat de l'apparition d'un des deux types de stress, soit celui de l'eau ou celui de l'azote. Dans notre cas, trois agriculteurs de cette classe apparaissent dans la zone 3. Cette zone correspond à l'apparition ou la dominance du stress azoté. Les agriculteurs de cette zone ont obtenu des rendements compris entre 80 et 90 Tonnes/ha.

Dans la zone 4, cinq agriculteurs sont observés. Les pratiques de fertigation de ces agriculteurs ont conduit à des phases de stress à la fois en eau et en azote. Ceci justifie les valeurs relativement faibles des rendements par rapport aux restes des agriculteurs de l'échantillon. Les valeurs de rendement de cette classe sont comprises entre 55 et 77 Tonnes/ha.

Cette figure 16 montre que l'intensité du stress détermine la valeur du rendement.

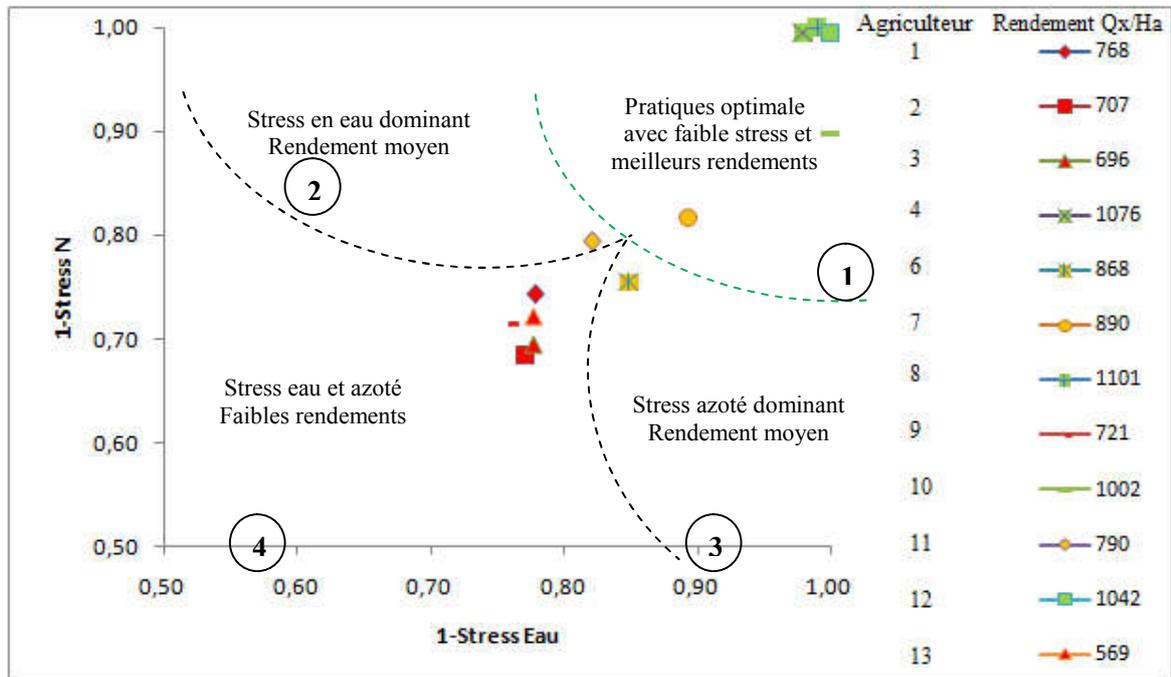


Figure 16 : Influence des stress d'eau et d'azote sur le rendement de la tomate sous serres pour un échantillon de 12 agriculteurs (3 niveaux de performance)

3.3.3 Identification du type de stress abiotique

Afin de montrer la manière avec laquelle le type de stress influence le rendement, nous nous proposons de traiter deux scénarios possibles. Dans le premier, le stress en eau est dominant, dans le deuxième c'est le stress azoté qui est dominant.

Pour cela, nous avons fait tourner le modèle pour chacun des agriculteurs suivis sur les scénarios 2 et 3 définis ci-dessus.

Sur les douze cas simulés, nous constatons que deux cas de figure peuvent être mis en évidence. Nous les représentons en figures 17, 18 et 19. Pour chacune des deux figures, le graphique (a) correspond au scénario 2 dans lequel la courbe bleue correspond à la variation du stress en eau le long du cycle de la culture. Le graphique (b) correspond au scénario 3. Dans

ce graphique, la courbe bleu correspond à la variation du stress en eau, et celle en rouge à la variation du stress en azote le long du cycle de la culture.

a. Prédominance du stress en eau

Le premier cas de figure est celui dans lequel on constate une dominance du stress en eau. Il correspond à la pratique de fertigation de l'agriculteur 13. Dans le graphique (a) de la figure 17, on peut observer que même en situation de confort azoté, la pratique d'irrigation de l'agriculteur affiche des phases répétées de stress hydrique, plus fréquentes à la fin du cycle cultural de la tomate. Ceci se vérifie, dans le graphique (b), après l'implication du calendrier de fertilisation où on ne constate pas de grand changement dans la forme du graphique bleu relatif à l'état de stress hydrique. Dans ce cas on interprète que le stress que subit la culture est un stress à prédominance hydrique. Le rendement obtenu par cet agriculteur est de 59 Tonnes/hectare .La chute de rendement dans ce cas est due principalement au stress hydrique.

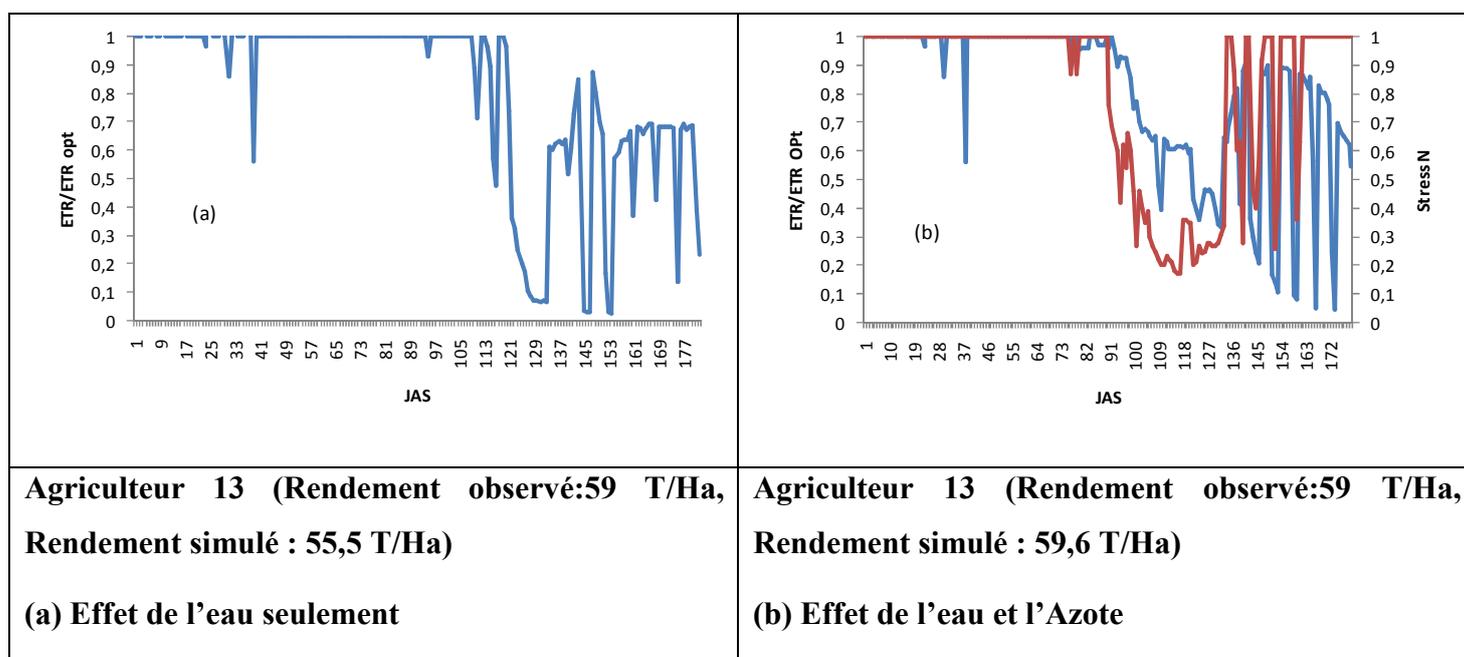


Figure 17 : Evolution de l'état de stress en eau, cas de l'agriculteur 13

b. Prédominance du stress azoté

La simulation du calendrier d'irrigation dans le cas de l'agriculteur 3 qui se trouve dans une situation de confort en azote a donné une variation de l'ETR très proche à l'ETR optimal (graphique a), avec un rendement de 110 Tonnes/ha (figure 18). Par contre, lorsqu'on prend en considération son calendrier de fertilisation, on remarque (graphique b) que la courbe bleu qui correspond à la variation du rapport ETR/ETR optimal change considérablement, ceci sous l'effet du stress azoté que l'on constate à travers la courbe rouge dans le même

graphique. Ceci a engendré une baisse considérable de rendement qui devient dans ce cas près de 70 Tonnes/hectare. Ainsi cette conduite de la fertilisation a engendré des phases de stress donnant lieu à des chutes de rendement.

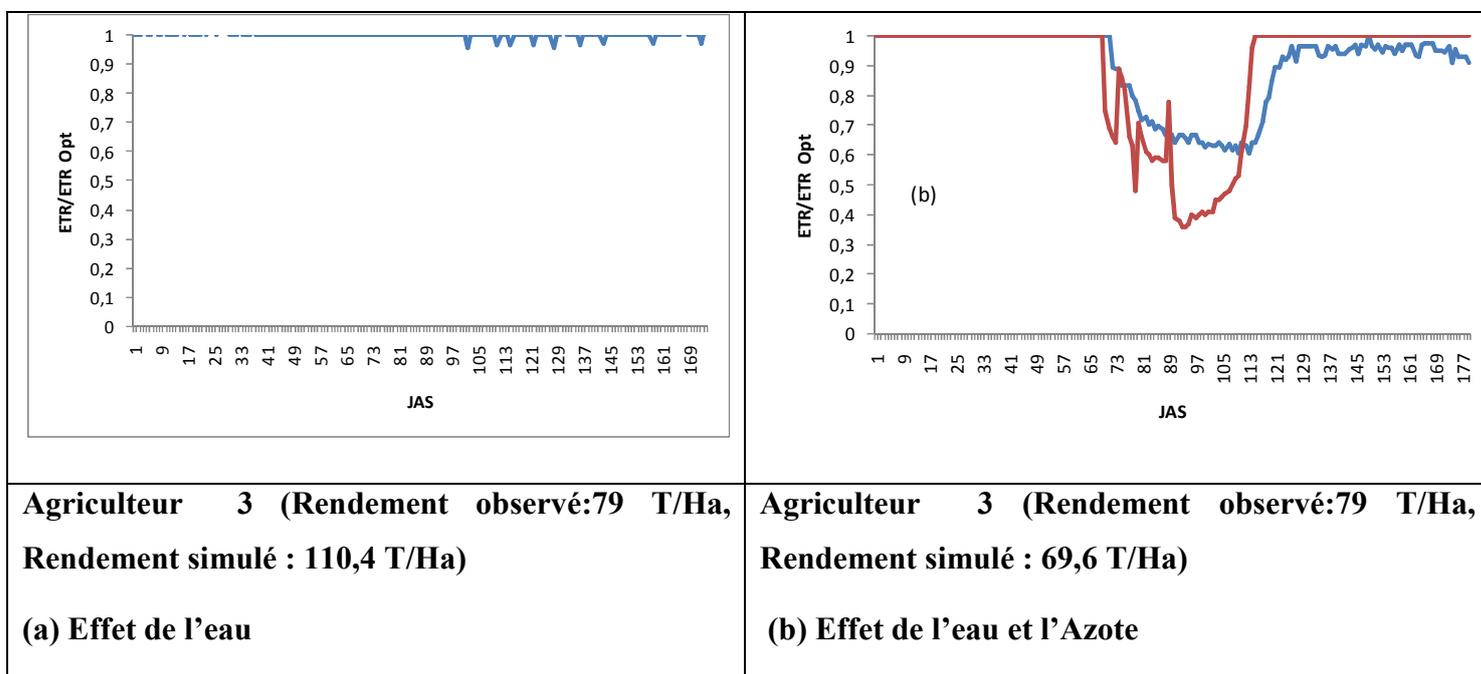


Figure 18 : Evolution de l'état de stress en eau, cas de l'agriculteur 3

c. Pas de stress enregistré

Afin de renforcer notre argumentation par rapport à l'influence des stress en eau et en azote sur le rendement, nous présentons un cas considéré comme témoin (figure 19). Il s'agit de l'agriculteur 4 qui, selon la figure 16 affiche une pratique optimale de fertilisation et un rendement optimal (zone 1). Le graphique (a) de la figure 19 montre des phases très timides de stress en eau avec un rendement simulé un peu plus élevé que le rendement observé qui égale à 108 Tonnes/hectare. Dans le graphique (b) et après introduction du calendrier de fertilisation de l'agriculteur, la forme de graphique affiche un léger changement suite à un stress azoté très limité dans le temps, le rendement a légèrement baissé. Dans ce cas on peut dire que la pratique de fertigation de l'agriculteur n'a pas induit ni de stress hydrique ni azoté. Ceci a permis à l'agriculteur d'obtenir le rendement le plus élevé parmi le reste des agriculteurs de notre échantillon.

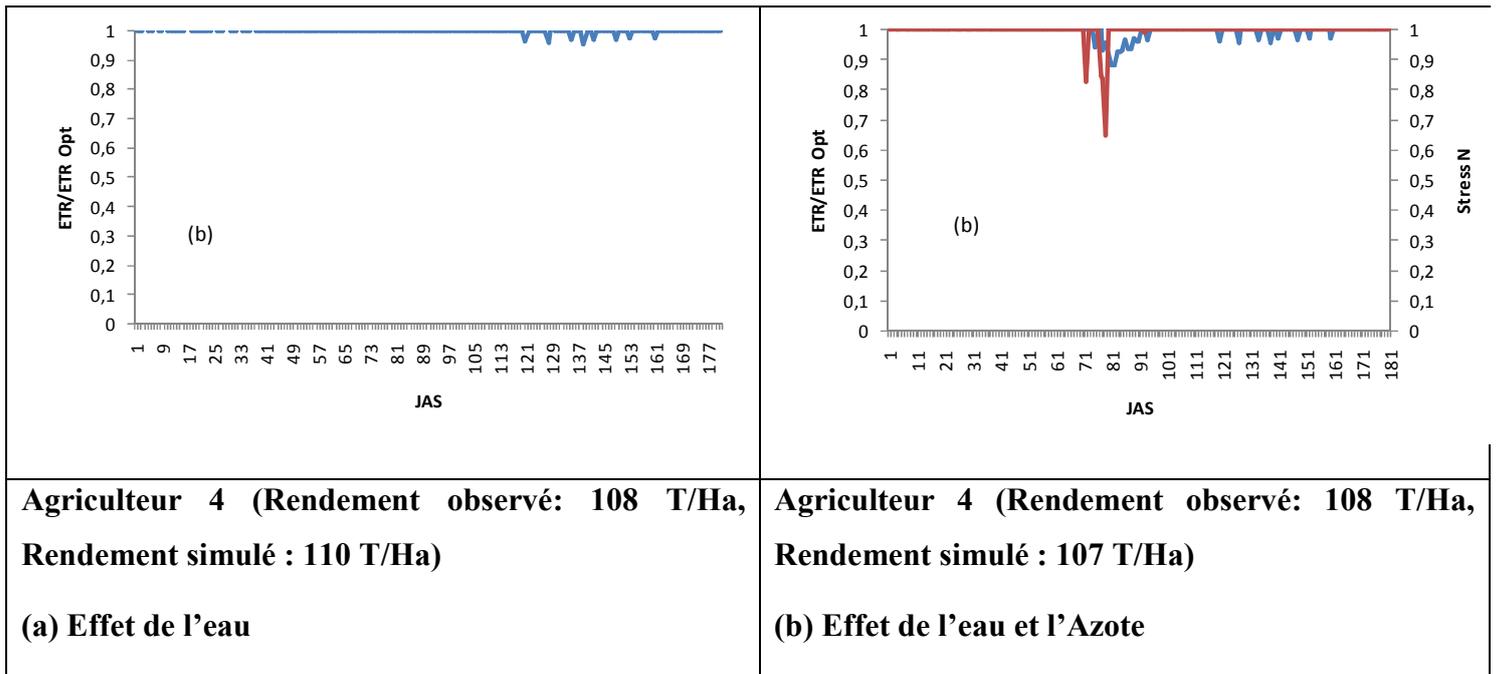


Figure 19 : Evolution de l'état de stress en eau, cas de l'agriculteur 4

3.3.4 L'impact des pratiques de fertigation sur le rendement

La gestion empirique des pratiques de fertigation par l'agriculteur fait que la production résulte des phases de stress en eau et en azote engendrés par sa pratique. Malgré l'analyse des deux types de stress par la modélisation, leur effet combiné ou conjoint est difficilement interprétable. En effet pour un type d'espèce pour laquelle les stress hydrique et azoté peuvent avoir le même niveau d'impact sur le rendement (et/ou le LAI), le stress azoté dans la mesure où son effet retard à un impact similaire à celui du stress hydrique atténue la demande en eau du fait de la diminution du LAI. L'effet contraire peut également se produire, mais il est plus contrôlable car le modèle fait en sorte de réduire la demande en azote en cas de stress hydrique. Quoiqu'il en soit, la concomitance ou non des deux stress durant le cycle, pénalise fortement la production.

Dans les précédentes figures, les effets des stress sur le rendement de tomate sous serre ont été illustrés. Cela a permis d'identifier quelques pratiques-types exercées par les agriculteurs conduisant à des situations de stress hydrique, azoté ou les deux au cours du cycle. Cela a également permis de quantifier les pertes en eau et en azote par lessivage qui non seulement ne contribuent pas à la production mais créent les conditions d'impact environnemental par gaspillage d'eau et d'azote et de pollution des sols et des eaux.

a. Une sur-irrigation susceptible d'engendrer un stress en azote

Au début du cycle de la tomate, et pendant le premier mois de la plantation, la demande en eau de la plante est relativement faible. A cette période, les températures dans la journée sont très élevées, elles peuvent atteindre 50°C à l'intérieur de la serre. Ajoutant à cela, l'application du fumier (de volaille généralement) favorise d'avantage l'augmentation de la température à l'intérieur de la serre. Pour y remédier, et afin de baisser la température, les agriculteurs apportent de l'eau en continu, avec des doses importantes. Ceci augmenta les pertes d'eau par drainage.

Il convient également de noter que du fait de la sur-irrigation, les quantités d'azote non assimilées risquent d'être lessivées, surtout dans le cas d'une culture à faible enracinement comme la tomate.

b. Une sur-fertilisation dans objectif d'augmenter le rendement

Certains agriculteurs ont la conviction qu'une logique de sur-fertilisation conduira à une augmentation de la production. Certes, un apport important de l'azote peut augmenter la biomasse de la plante mais à condition qu'il ait suffisamment d'eau dans le sol.

Si tel n'est pas le cas, l'efficience de l'azote diminue car ce surplus d'azote n'est pas utilisé par la plante. Cette efficience est encore plus faible s'il est apporté au delà de la période correspondant aux besoins élevés en azote. Un tel scénario est cependant peu réalisable étant donné que l'azote est apporté par irrigation. C'est peut être le cas si une partie de l'apport se fait par épandage. Mais il importe que cet apport d'engrais se fasse dans l'environnement immédiat des goutteurs afin d'accroître son efficience.

L'effet d'une sur-fertilisation sur les rendements est justifié par le fait qu'un développement excessif de la masse verte pousse les premiers bouquets de fleurs à apparaître à une hauteur supérieure à la normale. Ceci aura pour effet de réduire, en conséquence, le nombre de bouquets par plante, par conséquent le nombre de fruits, et de fait la production.

3.3.5 Quantification des pertes d'eau et d'azote qui résultent des pratiques de fertigation des agriculteurs

Dans cette partie, nous allons décrire un autre type de résultat pouvant être fourni par le modèle PILOTE-N. Il s'agit de la quantification des volumes d'eau perdus par drainage et des quantités d'azote perdus par les trois voies de déperdition. Ces pertes sont la conséquence des

pratiques de fertigation des agriculteurs. La figure 20 représente les valeurs des pertes d'eau et d'azote simulées par le modèle PILOTE-N.

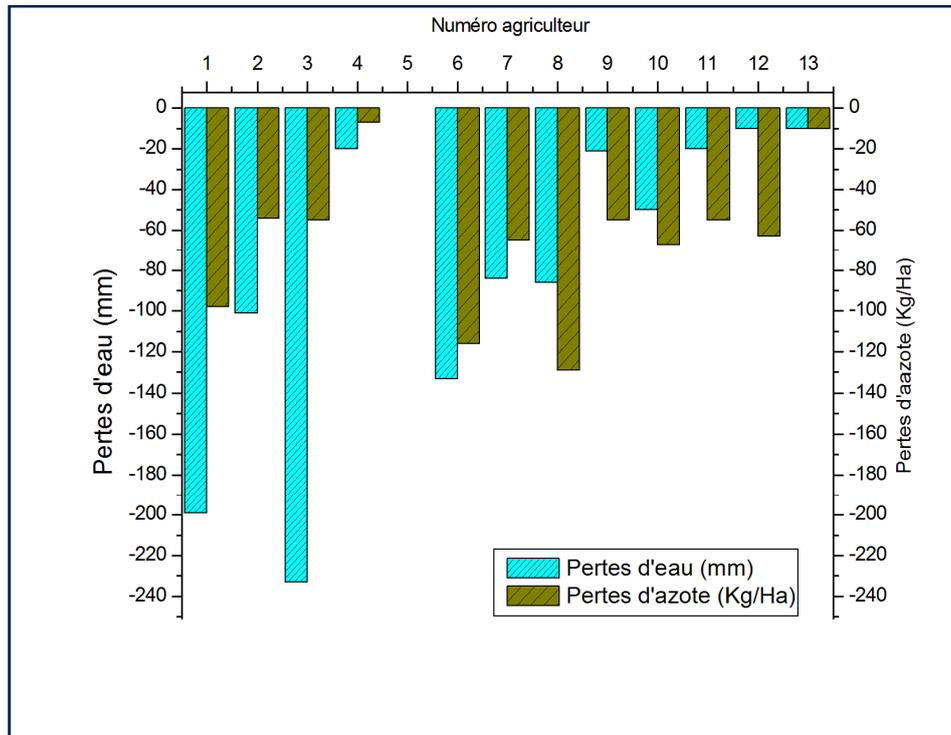


Figure 20 : Les pertes d'eau et d'azote résultant des pratiques de fertigation des douze agriculteurs suivis, résultat donné par le modèle PILOTE-N

A partir de ces données, et d'après l'identification des trois groupes d'agriculteurs en fonction de l'importance de stress auquel font face leurs cultures de tomate sous serres, nous pouvons, et à travers cette quantification des pertes et à l'intérieur de chacun des groupes identifiés précédemment, montrer également que ces pratiques conduisent à un impact environnemental très différencié que ce soit pour l'eau ou pour l'azote. Les agriculteurs 4 et 13 ont très peu de pertes en eau et en azote et de ce point de vue impactent peu sur l'environnement et sur la potentielle pollution de la nappe par l'azote. Seul l'agriculteur 4 en revanche arrive à concilier rendement élevé et impact faible puisque l'agriculteur 13 a un rendement quasiment inférieur de moitié. Parmi les deux autres agriculteurs parvenant à un rendement élevé, l'agriculteur 8 présente les pertes en azote les plus élevées du panel et l'agriculteur 12 est dans une situation intermédiaire. La figure révèle aussi que certains agriculteurs perdent de grandes quantités d'eau et d'azote avec de très faibles résultats agronomiques comme les agriculteurs 1 et 3 soit une efficacité particulièrement dégradée.

3.4 Conclusion

Nous avons montré à travers nos enquêtes auprès des agriculteurs que le souci d'irriguer est aussi prédominant que celui de fertiliser sachant que l'apport d'engrais se fait par le biais de la fertigation. Pour les agriculteurs, il s'agit d'une seule pratique la "fertigation". Cependant, l'arrêt de la fertigation doit être plus précoce que celle de l'irrigation proprement dite, afin de réduire l'apport d'engrais (et la perte de revenu) sans porter préjudice aux rendements.

En dépit de nombreuses incertitudes et d'un manque de données nécessaires à un calage complet tel qu' en station expérimentale bien contrôlée, nous avons correctement réussi à reproduire les rendements observés qui se distribuent sur une assez large gamme comprise entre 57 et 110 tonnes par ha grâce au modèle PILOTE-N comme en témoigne les valeur du coefficient de détermination(R^2), le MBE (The mean bias error) et le RMSE (The root mean square error) dont les valeurs sont respectivement 0,83, -0,04 et 0,1.

Nous avons effectué une analyse des données des bilans hydrique et azoté pour les douze agriculteurs suivis. Les apports d'eau et d'azote de ces agriculteurs (pour 90% des cas) dépassent les besoins de référence de la culture de tomate sous serre. Cette analyse a montré que ces pratiques de fertigation, engendraient des phases de stress abiotique. Ces phases les plus importantes sont à l'origine des rendements les plus faibles.

Les apports d'eau et d'azote qui n'arrivent pas aux bons moments par rapport aux besoins de la culture génèrent également des pertes estimées par le modèle, et donc d'importants impacts environnementaux (gaspillage de ressources y compris énergétiques pour la fabrication des engrais, pollution potentielle des nappes).

Ce chapitre met en évidence de larges possibilités d'amélioration des pratiques de fertigation. Les agriculteurs peuvent améliorer leur rendement en réduisant l'occurrence des phases de stress pendant le cycle cultural en adoptant un correct timing concernant les apports. Ceci peut lui permettre, avec les mêmes apports d'eau et d'azote, de valoriser au mieux la productivité de ces deux composants. Cela permettra également de limiter les pertes par lessivage à l'origine de risques d'impacts environnementaux et de pertes économiques.

A travers ce chapitre, nous avons testé puis appliqué un outil informatique pour améliorer l'efficacité des pratiques des agriculteurs. Les résultats de ce travail peuvent être exploités sur le terrain, dans le cadre d'une approche de conseil agricole. Ceci est le souhait des agriculteurs suivis qui ont manifesté un intérêt majeur quant au résultat de l'évaluation de leurs propres pratiques. Le chapitre suivant mobilisera cet outil dans l'esprit d'un apprentissage collectif pour l'amélioration des pratiques de fertigation.

Chapitre 4

Une démarche participative expérimentale pour améliorer les pratiques de fertigation des agriculteurs

Chapitre 4 : Une démarche participative expérimentale pour améliorer les pratiques de fertigation des agriculteurs

4.1 Introduction

A l'échelle de la parcelle, l'agriculteur mène une pratique de fertigation basée sur des indicateurs empiriques, liés à son expertise dite d'usage. L'accès aux facteurs de production conditionne fortement cette pratique. Dans les chapitres précédents nous avons évalué les pratiques de fertigation pour les cultures sous serres opérées par les agriculteurs. Ces évaluations ont concerné l'aspect efficience hydraulique du système de fertigation en goutte à goutte dans son état actuel et aussi la performance agronomique de ce système par la prise en compte des rendements obtenus ainsi que les pertes d'eau et d'engrais qui résultent des pratiques actuelles de fertigation des agriculteurs. Ce travail nous l'avons effectué en combinant : i) des travaux d'enquêtes sur le terrain de l'étude, ii) des mesures des indicateurs physiques de performance et iii) de la modélisation sur les dimensions 'eau' et 'fertilisation'. Une diversité de performances entre agriculteurs a été révélée par cette analyse. Les agriculteurs de notre échantillon ont activement participé, et dès la première phase dans l'opération d'évaluation des pratiques. L'élaboration de leurs calendriers d'irrigation et de fertilisation fut la première étape dans leur contribution à la présente démarche.

Les enquêtes de terrain ont montré que l'expertise d'usage des agriculteurs en matière de pratiques de fertigation résultait du croisement entre trois modes d'apprentissage locaux à savoir : l'expérience individuelle, les interactions entre agriculteurs et les interactions avec les vendeurs d'intrant connu localement sous le nom de grainetiers (vente/conseil). La combinaison des modes d'apprentissages n'est pas homogène d'un agriculteur à l'autre, et l'expertise d'usage et les pratiques qui en résultent sont hétérogènes par conséquent. Un jeune agriculteur qui arrive dans la zone n'a pas les mêmes réseaux solides (en termes d'expérience, de confiance et de capacité de financement) dont dispose un agriculteur déjà présent sur place depuis plusieurs années. Il en résulte également une diversité dans les productions à la serre pour une même culture. En particulier, nous avons mis en évidence que les agriculteurs expérimentés présentaient de meilleures performances que leurs collègues moins expérimentés.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'expérimentation d'un dispositif d'apprentissage collectif pour discuter et améliorer les pratiques de fertigation. En effet, nous avons observé l'existence d'un double mode de vulgarisation présent dans la région. Le premier est représenté par le cadre institutionnel en agriculture (institutions publiques de vulgarisation). Il

est défini par Joly (2004) sous le terme de « modèle linéaire ». Papy (2004) a décrit le cheminement de ce modèle linéaire comme suit : invention par le chercheur, test d'adaptation à différentes situations, promotion par les vulgarisateurs, adoption par quelques exploitations pilotes et diffusion à grande échelle. Dans ce processus, l'agriculteur n'est pas directement partie-prenante et les solutions sont souvent mal adaptées aux conditions réelles du terrain. De ce fait, le modèle linéaire est aujourd'hui largement mis en cause dans la littérature.

En effet, les agriculteurs enquêtés ne se considèrent pas impliqués par ce mode de vulgarisation descendant basé sur un mode d'apprentissage sélectif ciblant certaines catégories d'agriculteurs. Sa méthodologie se base essentiellement sur des manifestations de formation souvent occasionnelles (journée d'études), mettant ainsi l'agriculteur en position de récepteur et non d'acteur des apprentissages.

Le second mode de vulgarisation est moins linéaire et repose sur un conseil exercé par les grainetiers lors de la vente d'intrants. Il est à noter que ces grainetiers détiennent en fait un expertise technique provenant soit de leurs cursus de formation d'ingénieur, soit de leur contact permanent avec les ingénieurs développeurs appartenant aux firmes d'intrants qui, et à travers les expériences réalisés sur les semences, les produits phytosanitaires et les engrais, acquièrent une expertise technique et essaient de la transmettre aux acteurs de terrain et en particuliers les grainetiers (Naouri et al., 2018). Ce deuxième mode de vulgarisation est moins linéaire, et plus interactif du fait que le retour d'expérience contribue dans la production de l'information, ici l'agriculteur contribue dans le processus de production de l'information. Néanmoins ce mode d'interaction est avant tout ressenti par les agriculteurs comme une démarche d'intérêt commercial.

Néanmoins les acteurs de ces deux modes de vulgarisation sont porteurs d'une expertise technique que nous avons souhaité mobiliser dans notre dispositif, complémentaire de l'expertise d'usage des agriculteurs.

Notre hypothèse repose donc sur la levée des deux limitations citées plus haut : i) une implication plus active de l'agriculteur dans un processus de vulgarisation, ii) une interaction avec l'agriculteur sans intérêt commercial. Pour y arriver, nous avons choisi une approche innovante, participative et la plus neutre et objective possible. Ces approches qui mettent en synergie des connaissances scientifiques et empiriques portées par les praticiens, ont été proposées dans la littérature (Girard et Navarrete., 2005). Elles sont définies par le terme « approches interactives ». Elles visent essentiellement la co-construction entre chercheurs, ingénieurs et agriculteurs, des règles de décision par rapport à des contraintes, suite à une

analyse profonde des pratiques réelles des agriculteurs. L'ingénieur et le chercheur considèrent, dans ce cas, les pratiques de agriculteurs comme une solution concrète à un problème qu'ils ont à élucider en lui donnant une consistance théorique (Osty et Landais, 1993).

La démarche que nous avons engagée consiste à croiser d'une part les connaissances produites à travers nos travaux de terrain et la modélisation, notre expertise scientifique, l'expertise d'usage et les aspirations des agriculteurs, et l'expertise techniques des grainetier et des ingénieurs chargé de la vulgarisation au travers un processus d'apprentissage participatif.

Une démarche de type modélisation participative a ainsi été mise en place. Pour ce faire, l'appel à la modélisation (PILOTE-N) a pour objectif de mettre en relation les pratiques observées et leurs effets à travers des indicateurs liés à l'eau (bilan hydrique et efficience de l'eau) et à l'agronomie (rendement en tomates). D'un point de vue méthodologique, nous avons mobilisé les paramètres de modélisation calés dans le chapitre précédent, et que nous considérons comme valides sur le plan expérimental.

Dans cette approche de simulation participative, trois aspects sont pris en considération : 1) aborder la question des pratiques de fertigation avec le vocabulaire local et les grandeurs physiques utilisées par les agriculteurs, 2) faire participer l'agriculteur au processus d'apprentissage comme acteur à part entière et non comme un simple apprenant, et 3) simuler par modélisation les effets des pratiques sur le rendement de la culture, 'de tomate' dans ce cas d'étude. Le recours à la modélisation permet ainsi d'expérimenter des situations virtuelles sans conséquences réelles sur la production et sans intérêt commercial vis-à-vis de l'agriculteur. Notre deuxième hypothèse réside donc dans l'idée que la prise en compte de ces trois aspects constitue des facteurs de réussite à même de renforcer les capacités professionnelles des agriculteurs en matière de fertigation.

Le chapitre sera structuré comme suit :

- la méthodologie employée et les différentes étapes suivies pour la conception de la démarche ;
- la description de la mise en œuvre de la démarche ;
- et la présentation du retour d'expérience des agriculteurs et des débats autour des pratiques.

4.2 Méthodologie

Afin d'atteindre les objectifs décrits en introduction, une démarche participative axée sur un processus interactif a été conçue.

Deux concepts avaient été mobilisés dans notre approche, la participation et l'apprentissage par simulation, d'où le recours au terme 'simulation participative'. L'apprentissage par simulation permet une autoréflexion et une remise en question des propres pratiques des agriculteurs (Martin 2014, Dolinska, 2017). Selon certains auteurs, l'apprentissage par la simulation vient remplacer les pratiques actuelles d'apprentissage vu les avantages qu'il présente (Senge 1990, Isaacs et Senge 1992, McCown et al. 2009, Dolinska, 2017). En liant les théories de l'apprentissage à la pratique de la simulation et du jeu, Ulrich (1997) énumère les caractéristiques de la simulation qui la rendent potentiellement plus productive pour le développement de l'innovation que d'autres méthodes: un retour immédiat, une possibilité d'expérimenter sans conséquences négatives et une situation d'apprentissage abstraite et simplifiée.

Dans notre cas d'étude, l'application de la simulation sur les pratiques de fertigation s'inscrit dans la logique d'apprentissage par simulation (learning by simulating) à la place du concept courant déjà en place et connu d'apprentissage par la pratique (learning by doing).

Dans notre logique, le concept de la participation a été associé à cette approche d'apprentissage par simulation ; faire participer l'agriculteur au processus d'apprentissage rendra ce dernier plus efficace .Ceci concrétise la théorie d'apprentissage interactif par la participation des agriculteurs mêmes comme partie prenante de l'opération d'apprentissage.

La figure 21 récapitule le déroulement des étapes de la démarche avec, dans les encadrés de droite, les participants, l'objectif et le lieu de déroulement de chaque étape. Ce processus a impliqué des scientifiques, des ingénieurs vulgarisateurs et grenetiers et des agriculteurs. Cette composition du groupe est argumentée par la complémentarité de leurs connaissances à savoir: l'expertise scientifique portée par les chercheurs, l'expertise technique portée par les ingénieurs et l'expertise d'usage portée par les agriculteurs. La démarche a été conçue en trois étapes : 1) une réflexion méthodologique sur la démarche accompagnée d'une conception des outils et supports à mobiliser dans la simulation participative, 2) le test de l'outil avec des étudiants de l'université de Tipaza et des agriculteurs référents, et 3) la mise en œuvre de l'outil avec les agriculteurs avec qui le suivi de la fertigation avait été effectué. La démarche a

été construite sur la base des résultats obtenus lors du suivi interactif réalisé sur 13 exploitations agricoles (figure 21).

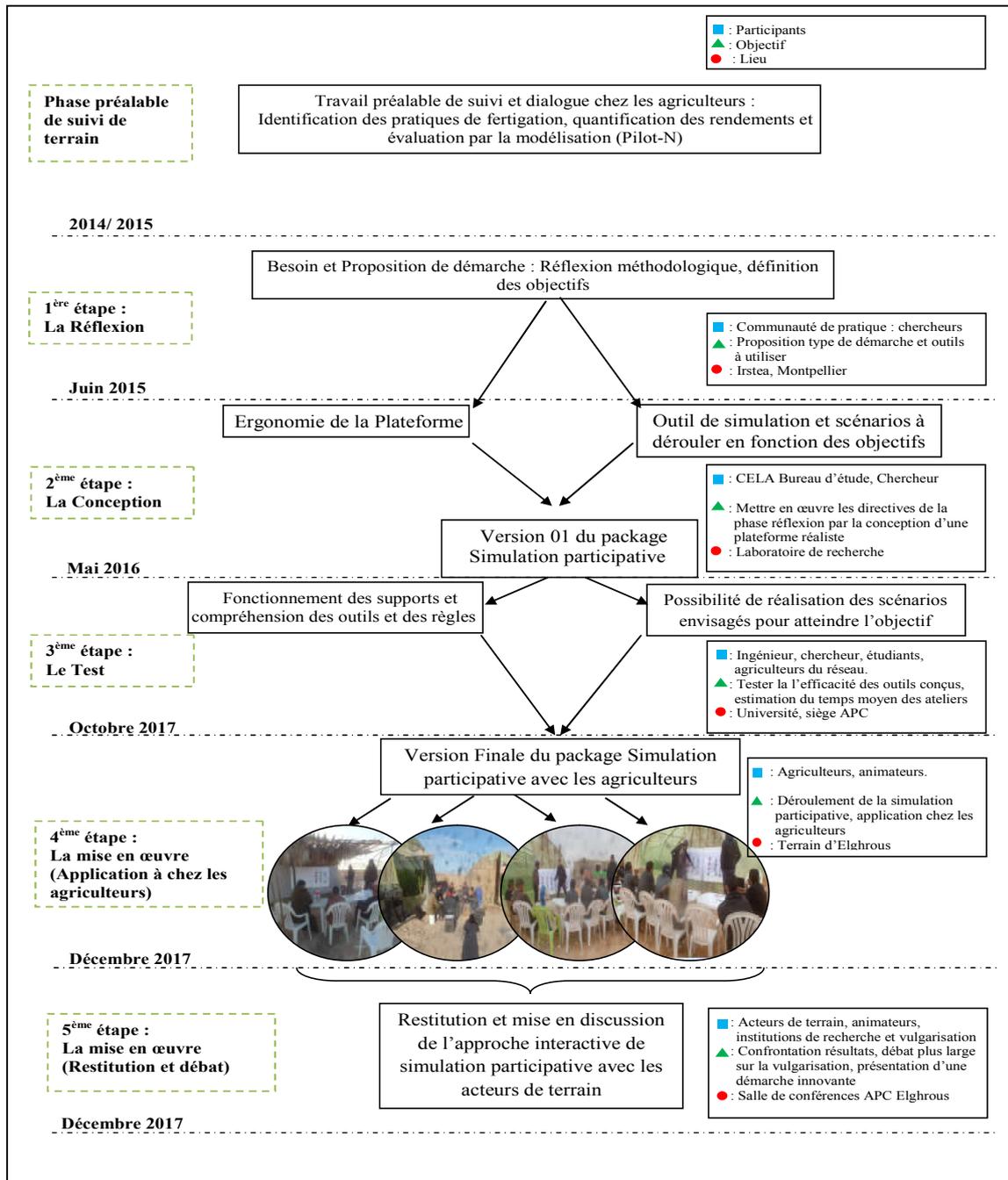


Figure 21 : Schéma synthétique des étapes de la démarche participative avec les participants, les objectifs et le lieu de déroulement de chaque étape

4.2.1 Première étape, la réflexion et la conception

Le besoin de mener une démarche de simulation participative est apparu au cours de la phase expérimentale de terrain, au moment du suivi et de la mesure des indicateurs de performance chez les agriculteurs. Pendant cette phase, les pratiques de fertigation ont été co-identifiées et expliquées, en fonction des contraintes, par les agriculteurs et par nous-mêmes. Aussi, la manière dont ces agriculteurs ont construit leurs connaissances de conduite de leurs cultures sous serre a été analysée, et notamment la fertigation. Tous ces éléments d'information constituent les règles de base de la démarche de simulation participative, soit une première contribution des agriculteurs dans le processus interactif d'apprentissage qui intègre leurs conditions réelles.

La conception de ce processus a ensuite été discutée dans le cadre de la communauté Montpellieraine de la pratique (www.particip.fr), elle réunie des concepteurs de démarches participative de l'UMR G Eau et de la société Lisode à Montpellier. Il s'agit d'un espace de discussion qui rassemble « en salle » des chercheurs souhaitant concevoir et tester collectivement une démarche participative en s'entraînant à faciliter les échanges entre les acteurs avant sa mise en œuvre sur le terrain (Dionnet et al., 2013, Braiki et al., 2018). De plus, c'est un espace qui permet de réfléchir à plusieurs cerveaux pour anticiper un maximum de choses, il permet aussi de questionner la pertinence d'une approche et/ou d'un outil, ainsi que sa fluidité et sa faisabilité.

Lors de notre communauté de pratique, l'approche à mener et les principaux supports adéquats ont ainsi été définis. Il a été recommandé de mener un dialogue multi-acteurs au sujet des pratiques de fertigation, dans le but de co-construire des pratiques référentielles à travers une démarche originale interactive que nous avons nommée 'simulation participative'. Les principaux outils et supports à mobiliser dans la démarche participative ont également été prédéfinis. En collaboration avec le bureau d'étude 'SAIDANI AMINE' qui a mobilisé ses connaissances de l'agriculture algérienne et des démarches participatives, nous avons ensuite conçu en détailles outils didactiques à mobiliser dans la démarche participative ainsi que les règles et scénarios à mobiliser lors des ateliers participatifs d'autre part. Les règles définies dans la démarche reflètent ainsi la situation réelle dans laquelle se trouvent les agriculteurs, en particulier par rapport au mode d'accès à l'eau et aux engrais. Nous avons décidé de prendre la culture de la tomate sous serre comme objet de discussion pour la démarche. Ce choix est justifié par le fait que cette culture soit qualifiée de 'phare' dans notre contexte d'étude où la plus part des agriculteurs la cultivent afin de tirer un maximum de

profit. Ce profit est soutenu par la hausse des prix dans le marché national au moment de la production de la tomate à El Ghrous. Ceci nous permettra par conséquent d'avoir une diversité d'agriculteurs participant dans nos ateliers participatifs.

Durant cette première phase de réflexion et conception, trois types d'outils ont été conçus:

- une plateforme de simulation à destination des agriculteurs pour remplir leurs calendriers de fertigation,
- deux outils numériques de génération de calendriers et de simulation des rendements,
- un troisième outil d'affichage des résultats de chaque scénario (eau, engrais en rendement).

a) *Support de génération des calendriers de fertigation*

Le support principal utilisé lors de ces ateliers participatif s'est représenté par le calendrier simplifié de fertigation (figure 22). C'est un tableau où tous les termes sont exprimés en langue arabe et utilisés localement par les agriculteurs mêmes.

Le tableau présente les trois phases du cycle cultural de la tomate, à savoir : le démarrage, la croissance et la maturation. Celles-ci correspondent aux phases du cycle cultural de la tomate connu dans la littérature comme suit : la germination et le repiquage, la croissance, la floraison et la fructification – maturation. Les dates de début et de fin de chaque phase sont celle adoptées par les agriculteurs pour cette culture.

Deux principales composantes constituent le calendrier des agriculteurs: les irrigations et les fertilisations. Pendant l'atelier, les agriculteurs sont appelés à exprimer les doses en durée (heures) pour les irrigations et en quantité (Kg par serre) pour les engrais. Afin de réduire la complexité des calendriers, une seule fréquence d'irrigation et de fertilisation est indiquée par cycle de culture.

برنامج السقي و التسميد
غراسة الطماطم داخل البيوت البلاستيكية (منطقة الخروس الفلاحية)
الموسم: 01 الفلاح

المرحلة	ديماراج	مسجرة	قطة
التاريخ	10/15 - 09/01	12/15 - 10/16	03/01 - 12/16
 ماء  أنقري	الدور		
	المدّة (ساعة)		
	الكمية (كغ)		

الموسم: 02

المرحلة	ديماراج	مسجرة	قطة
التاريخ	10/15 - 09/01	12/15 - 10/16	03/01 - 12/16
 ماء  أنقري	الدور		
	المدّة (ساعة)		
	الكمية (كغ)		

الموسم: 03

المرحلة	ديماراج	مسجرة	قطة
التاريخ	10/15 - 09/01	12/15 - 10/16	03/01 - 12/16
 ماء  أنقري	الدور		
	المدّة (ساعة)		
	الكمية (كغ)		

Figure22 : Calendrier type utilisant les termes locaux

b) Outils numériques de génération de calendrier et de simulation des rendements

Deux modèles numériques complémentaires ont été utilisés dans les ateliers participatifs. Le premier permet de générer des calendriers détaillés (au jour près) en partant des calendriers simplifiés présentés précédemment. Il s'agit du modèle 'Gén-Cal', ou générateur de calendriers, conçu par nous-mêmes spécialement pour cette démarche participative. Il a pour but de convertir les valeurs des apports exprimées en des doses d'irrigation (mm) et de fertilisation (Unité de N par Hectare). Les calendriers détaillés d'irrigation et de fertilisation pour chaque agriculteur constituent des données d'entrée du modèle de simulation des rendements.

Le deuxième outil utilisé est le modèle de culture Pilote-N déjà calé par rapport aux conditions et caractéristiques de la zone d'étude (chapitre 3). Le modèle Pilote-N permet de simuler à partir des calendriers d'irrigation et de fertilisation la production en kilogrammes de tomate qui en résulte. Il permet également d'exprimer les pertes par drainage (sur irrigation en mm) et par lixiviation et dénitrification d'azote (sur fertilisation en Kg/Ha) pour chacun des calendriers simulés.

c) L'affichage des résultats des simulations

Les résultats des simulations contiennent l'apport total en eau d'irrigation (mm), en engrais (Kg/ha) et le rendement obtenu (Tonnes/ha). Présenter ces résultats en chiffres conduirait les

participants à faire une sorte de classement des agriculteurs. Ce n'est pas dans la philosophie de la démarche que de mettre les agriculteurs en compétition, mais à l'inverse il était question de créer une atmosphère d'entre-aide. Il s'agit davantage de définir les meilleures pratiques pour des classes de rendement. Pour cela, nous avons opté pour un affichage des résultats à partir de photos qui traduisent visuellement les grandeurs physiques des apports d'eau, d'engrais et de production. Les figures 23, 24 et 25 montrent les photos qui correspondent aux trois niveaux des paramètres cités.

		
$I < 400 \text{ mm}$	$400 \text{ mm} < I < 600 \text{ mm}$	$R > 600 \text{ mm}$

Figure 23: Photos indiquant le taux de satisfaction des besoins en eau

		
$N < 120 \text{ U}$	$120 \text{ U} < N < 180 \text{ U}$	$N > 180 \text{ U}$

Figure 24 : Photos indiquant le taux de satisfaction des besoins en N

		
$R < 25 \text{ Qx / serre}$	$25 \text{ Qx} < R < 35 \text{ Qx/serre}$	$R > 35 \text{ Qx/serre}$

Figure 25: Photos indiquant les trois niveaux de rendements

4.2.2 Deuxième étape, le test de la démarche et le déroulement des simulations

a) Le test des outils de la démarche participative

Lors de cette étape, nous avons testé les outils didactiques ainsi que les scénarios proposés pour cette démarche participative grâce à deux occasions distinctes : un premier atelier testé eu lieu à l'université de Tipaza, avec des étudiants et des ingénieurs ; un second atelier avec des agriculteurs référents, avec qui le travail participatif a commencé bien avant, à l'échelle de la commune d'El Ghrous.

Ces séances de test nous ont permis de faire ressortir les lacunes et dysfonctionnements quant à l'aspect ergonomique de la simulation. Par exemple le calendrier de fertigation qui était très long pour remplir a pris sa forme finale après plusieurs modifications et simplifications. L'outil d'affichage a aussi fait l'objet d'améliorations à partir des valeurs numériques (des quantités d'eau, d'engrais (azote) et de production) qui étaient moins illustratives que l'affichage par photos utilisé dans la version finale.

Les scénarios à dérouler dans les ateliers participatifs ont également fait l'objet d'adaptations, ils ont été simplifiés après plusieurs tests pour aboutir au final à trois scénarios permettant d'atteindre l'objectif de la démarche avec le moins de temps possible. Ceci en raison du nombre d'activités prévues lors des ateliers à savoir : la présentation de l'outil, le remplissage des calendriers la saisie des données, la simulation avec modèle Pilote-N, l'affichage des résultats et le débat.

A l'issue des deux ateliers de test, la version finale de l'approche participative a été définie.

b) Déroulement des simulations participatives (version finale du package de simulation)

Les simulations se sont déroulées en trois tours ; chaque tour reflète un cycle cultural qui débute en septembre et prend fin à la mi-mars. Lors de chacun des tours, les agriculteurs remplissent un calendrier de fertigation.

Au premier tour, les agriculteurs dévoilent leurs calendriers de fertigation qui dépendent de leurs propres contraintes et limitations ; ceci conduit aux valeurs de rendements qu'ils attendent. Ce qui constitue une validation du modèle. Cette étape permet de mesurer le degré d'adhésion de l'agriculteur au processus d'apprentissage participatif, car on peut savoir si les calendriers étaient sérieusement remplis par les participants où dans le cas contraire implique que l'agriculteur n'adhère pas à la démarche. D'autre part, cette étape nous permet de gagner

la confiance des participants en acquérant une crédibilité pour l'usage du modèle de simulation Pilote-N.

Avant le deuxième tour, on explique aux agriculteurs que les rendements du premier tour peuvent être réalisés avec moins d'eau et d'engrais. Les apports supplémentaires d'eau et d'engrais sont exprimés en pourcentage. On montre également les effets du stress engendré par des pratiques d'irrigation et de fertilisation sur les rendements. A partir de là, les agriculteurs proposent de nouveaux calendriers de fertigation, si ceux-ci leur paraissent réalisables, et précisent les changements potentiels. Ceci permet d'identifier les divergences par rapport à leurs pratiques initiales.

L'objectif de cette étape est de vérifier si l'agriculteur accepte d'être questionné sur sa pratique par un des participants dans l'atelier ; un changement dans la pratique de fertigation implique un signe positif dans le processus d'apprentissage.

Au troisième tour, une pratique optimale avec les doses et les fréquences correspondantes est présentée et permet d'avoir un meilleur rendement (dans les mêmes conditions de terrain). Suite à cela, les agriculteurs reformulent leurs calendriers de fertigation, ce qui constitue une application directe de l'apprentissage sur la pratique de fertigation.

L'articulation entre les trois tours se fait par des débats autour des pratiques. Ces débats portaient essentiellement sur les indicateurs incitant les agriculteurs à déclencher les apports d'eau et d'engrais par fertigation, aussi sur les logiques derrière l'adoption de tel ou tel calendrier de fertigation en fonction des stades phycologiques de la tomate sous serre. L'accent est mis à chaque fois sur la source de l'expertise d'usage.

La plus-value qu'apporte cette approche d'apprentissage est de visualiser immédiatement les effets des pratiques de fertigation sur les rendements et de pouvoir, en même temps, montrer les effets des changements de pratiques sur le rendement.

4.2.3 Troisième étape, la mise en œuvre de l'approche participative

a) Ateliers de simulation participative chez les agriculteurs

Quatre ateliers de simulation participative ont été effectués séparément chez les agriculteurs. 23 agriculteurs ont participé. Ils ont été regroupés en fonction d'un critère de proximité géographique. Ce choix méthodologique a été fait suite à : 1) la difficulté rencontrée pour faire déplacer l'agriculteur loin de son exploitation, 2) la volonté des agriculteurs chez lesquels nous avons organisé les ateliers de ne pas avoir d'agriculteurs 'externes' de leurs

réseaux sur leurs exploitations. Ceci représente pour eux une sorte de vigilance contre la mauvaise œil des visiteurs.

Ce choix méthodologique avait l'avantage d'une bonne maîtrise du déroulement des ateliers vu le nombre limité d'agriculteurs par atelier.

Déroulement de l'atelier de simulation participative

Autour d'une table ronde, les ateliers de simulation participative se sont déroulées. Après avoir remercié les agriculteurs participant d'accepter notre invitation, nous les avons distribué des calendriers vides de fertigation (cf. figure22). L'animateur a procédé à l'explication des différentes étapes de l'atelier à savoir : Le remplissage des calendriers, la simulation des calendriers de fertigation par le modèle Pilote-N, l'affichage des résultats et la signification du support image conçu à cet effet ainsi que les le nombre de tours à simuler lors de chaque atelier. La durée moyenne par atelier a été estimée à 90 minutes.

La figure26 montre des photos prises lors des ateliers organisés sur le terrain.

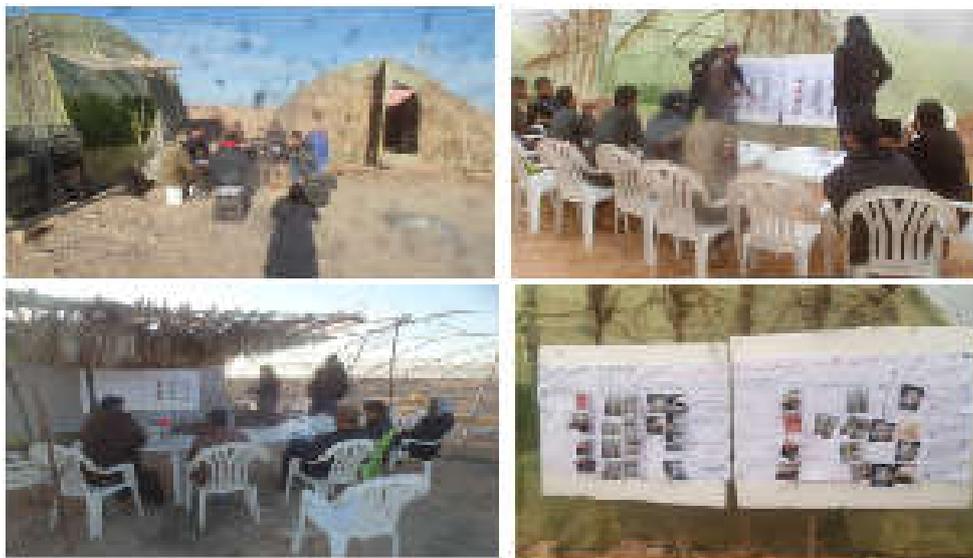


Figure26 : Déroulement des simulations participatives chez les agriculteurs

b) Atelier de restitution, démarche participative par expo-photos

A travers cette approche, nous avons souhaité initier une discussion collective sur les pratiques de fertigation et les conditions de leur possible amélioration.

Deux principaux objectifs sont visés par l'utilisation de la photographie. Dans la continuité du processus interactif défini dans ce chapitre, le premier objectif est de discuter

collectivement les pratiques des agriculteurs en impliquant tous les acteurs. Le deuxième objectif porte sur le partage des résultats d'application de la simulation participative avec un échantillon d'agriculteurs.

Afin de mettre en valeur les résultats des ateliers de simulation participative réalisés avec les agriculteurs, et de présenter à un large public l'approche conçue et utilisée à des fins d'apprentissage interactif en partant des réelles pratiques de fertigation., un atelier de restitution s'est tenu dans la commune d'El Ghrous.

Tout atelier participatif mobilise des outils qui visent à rendre dynamique et interactif le public participant à l'atelier. Ici, une approche par l'usage de la photographie a été utilisée afin d'introduire notre problématique. C'est une plateforme de discussion basée sur des photographies prises par les acteurs sur le terrain (Kankeu et Tiani, 2014) afin de mettre en débat les impacts des pratiques agricoles (Braiki et al., 2018). L'usage de la photographie dans une démarche participative (le photo-participation) est une démarche souvent utilisée pour réaliser un diagnostic de territoire ; les photos traduisent la vision du territoire par ses acteurs et servent de base de travail (Dionnet et al., 2017). Il est à préciser que dans notre cas, nous avons pris les photos nous-mêmes durant différentes phases du diagnostic de terrain. Les agriculteurs peuvent donc les reconnaître puisqu'elles sont prises dans leur territoire.

Lorsque nous sommes en présence d'un public hétérogène, le risque de s'écarter du sujet principal de la discussion est présent. Le recours à la photographie permet d'orienter et de centrer l'objet du débat. L'usage de la photographie présente aussi un autre avantage, il s'agit de permettre aux participants d'exprimer un point de vue (une force ou une faiblesse du territoire par exemple) devant les autres participants avec son propre regard à travers la photo « *je vous montre comment je vois le monde* ».

Les photos utilisées dans l'atelier ont été choisies soigneusement, ce qui permet de cadrer le débat et de focaliser les interventions des agriculteurs sur des questions en lien avec leurs pratiques de fertigation de leurs cultures sous serres.

Déroulement de l'atelier de restitution

En plus des organisateurs/animateurs (des chercheurs, des étudiants et un agriculteur/technicien spécialisé), l'atelier a réuni 15 agriculteurs de profils différents, ainsi que trois représentants de l'ITDAS (Institut technique de développement de l'agriculture saharienne) et un représentant du CRSTRA (Centre de recherches scientifiques et techniques en régions arides).

L'atelier a été scindé en trois étapes. Après avoir souhaité la bienvenue à l'atelier, les participants ont tout d'abord été sollicités pour choisir deux photos reflétant un point fort et un frein pour le développement de l'agriculture dans la zone d'étude (Figure 27).

Dans la deuxième étape, nous avons défini les six axes thématiques suivants: ressources, pratiques, technologie, infrastructure, appui/conseil et commercialisation. Les participants ont positionné chacune des deux photos choisies sur l'un de ces six axes. Ceci selon leur interprétation et le message qu'ils souhaitent transmettre à travers les deux photos choisies.

Lors de la troisième étape, et en fonction des résultats de l'exercice avec les photos, la problématique des apprentissages dans les pratiques agricoles est ainsi abordée. La démarche de simulation participative et ses résultats sont aussi présentés. L'objectif est de mettre en débat les perspectives de son application sur le terrain.

La figure 27 présente quelques photos prises pendant l'atelier de restitution.



Figure 27 : Déroulement de l'atelier expo-photos

4.3 Résultats

4.3.1 Synthèse des résultats des ateliers de simulation participative effectués chez les agriculteurs

A travers le déroulement des ateliers de simulation participative chez les quatre groupes d'agriculteurs, nous avons caractérisé l'expertise d'usage et le processus d'apprentissage des agriculteurs participants par le suivi de l'évolution des pratiques de fertigation. Ce suivi s'est concrétisé par la quantification des apports d'eau par irrigation en millimètre (mm), et d'azote par fertilisation en kilogramme d'azote par hectare (Kg/ha), comme le montre le tableau 2. Ce tableau résume le comportement des 23 agriculteurs ayant participé aux ateliers par rapport au fait de changer ou non leurs pratiques de fertigation pour leurs tomates sous serres, selon les pratiques types proposées lors des ateliers sur la base d'une simulation participative de leurs pratiques initiales.

Sur les 23 agriculteurs participants, 17 agriculteurs ont changé au moins une de leurs pratiques d'irrigation (cases en bleu) ou de fertilisation (cases en vert) pendant au moins une période du cycle. Les six autres agriculteurs ont maintenu leurs pratiques. Trois parmi eux étaient dans un même atelier et tous étaient des anciens agriculteurs expérimentés.

Sur les 17 agriculteurs ayant changé leurs pratiques, dix agriculteurs ont changé leur pratique de fertigation, quatre agriculteurs ont changé seulement l'irrigation et trois ont changé seulement la fertilisation).

Il a été noté que chez les jeunes agriculteurs, le changement dans les pratiques est plus présent que chez les autres agriculteurs. En effet, sur deux ateliers impliquant 13 jeunes agriculteurs, dix ont changé leurs pratiques. Ces ateliers étaient caractérisés par un dynamisme particulier et le débat autour des pratiques était animé. Ceci s'est manifesté par une participation effective des jeunes agriculteurs jusqu'à même l'interprétation de certains effets des pratiques sur le rendement.

Tableau 2 : Évolution quantitative des apports d'apports d'eau et d'azote pour les 23 agriculteurs participants dans les ateliers de simulation participative

Les cases colorées reflètent l'étape pendant laquelle le changement dans les apports d'eau ou d'engrais est opéré par les agriculteurs (2^{ème} ou 3^{ème} étape).

Indice de l'agriculteur	Apport total de l'eau par l'irrigation (mm)			Apport total de l'azote par la fertilisation (Kg/Ha)			Rendement de la tomate en Qx/serre		
	1 ^{er} tour	2 ^{ème} tour	3 ^{ème} tour	1 ^{er} tour	2 ^{ème} tour	3 ^{ème} tour	1 ^{er} tour	2 ^{ème} tour	3 ^{ème} tour
1	680	680	680	76	76	80	23,4	23,4	24,12
2	720	630	630	180	180	178	19	20,48	20,48
3	510	482	482	193	182	182	24	25	28,52
4	790	790	650	210	210	190	37,36	37,36	36,24
5	660	560	560	160	152	152	30	33,28	33,28
6	520	412	412	50	50	50	7,64	12,8	12,8
7	907	907	907	118	118	118	38,08	38,08	38,08
8	907	907	907	118	118	118	38,08	38,08	38,08
9	860	860	860	155	155	155	37,32	37,32	37,32
10	820	730	730	132	132	132	13	15,2	15,2
11	640	520	520	50	50	50	7,64	19,2	19,2
12	760	760	760	127	127	127	36	36	36
13	802	736	736	237	220	200	36,04	37,2	37,2
14	732	732	732	155	155	140	35,72	35,72	35,28
15	560	560	500	190	190	193	13	13	24,24
16	460	460	460	85	85	85	9,12	9,12	9,12
17	585	520	520	256	240	240	21,24	28,8	28,8
18	610	610	610	160	160	160	12,96	12,96	12,96
19	732	660	660	193	193	193	24,64	26,4	30,24
20	691	620	620	220	180	180	29,4	28	28
21	782	680	680	210	190	190	30	34,48	34,48
22	690	690	690	240	236	236	35,28	34,08	37,04
23	736	736	736	218	205	205	30	30	35,28

4.3.2 Mobilisation des indicateurs de stress pour qualifier les pratiques de fertigation

En mobilisant les indicateurs de stress définis au chapitre 3 de la thèse, et dans le but de montrer les effets des pratiques sur les rendements, nous avons analysé de façon qualitative

les pratiques de fertigation des agriculteurs par combinaison des indicateurs de stress d'eau et d'azote (Figure 28).

Les deux indicateurs de stress en eau et de stress azoté ont été remobilisés dans la démarche et de manière identique sous la forme de (1-stress). La figure 28 montre donc le résultat de la combinaison des deux indicateurs de stress (1- Stress Eau et 1- Stress Azote) à l'issue d'un premier tour de simulation des pratiques de fertigation des agriculteurs participant.

Les pratiques initiales des agriculteurs sont présentées comme un nuage de points dispersés, chacun de ces points représente une combinaison entre l'état de stress en eau et en azote que subi la culture de tomate, lié à la pratique de fertigation d'un agriculteur donné. L'espace du graphique a été réparti en quatre zones dont chacune représente un niveau de la performance agronomique. La zone 1 caractérise une catégorie d'agriculteurs dont les pratiques de fertigation présentent de très faibles valeurs de stress, les rendements de cette catégorie sont les meilleurs. La zone 2 représente une catégorie dont les pratiques de fertigation engendrent un stress à prédominance hydrique. Dans la zone 3, c'est le stress azoté qui est prédominant. Enfin, la zone 4 représente une catégorie d'agriculteurs dont les pratiques de fertigation engendrent un stress hydrique et azoté et dont les rendements sont les plus faibles.

Il est observé que les pratiques de 8 agriculteurs sur 23 sont classées dans la zone 1, reflétant les pratiques optimales avec des rendements supérieurs à 75 Tonnes/Ha (équivalent à la serre de 30Qx).

Les pratiques de huit autres agriculteurs sont classées dans la zone 2, où les rendements sont des valeurs moyennes comprises entre 50 et 75 Tonnes/Ha. Cela est dû à un stress en eau, raison pour laquelle les rendements sont en-dessous de l'optimum.

Les pratiques de sept agriculteurs sont classées dans les zones 3 et 4. Leurs cultures ont subi des stress plus importants, avec une dominance du stress azoté et un effet évident sur le rendement. Les rendements obtenus dans ces deux zones sont les plus faibles (inférieurs à 20 Qx/serre).

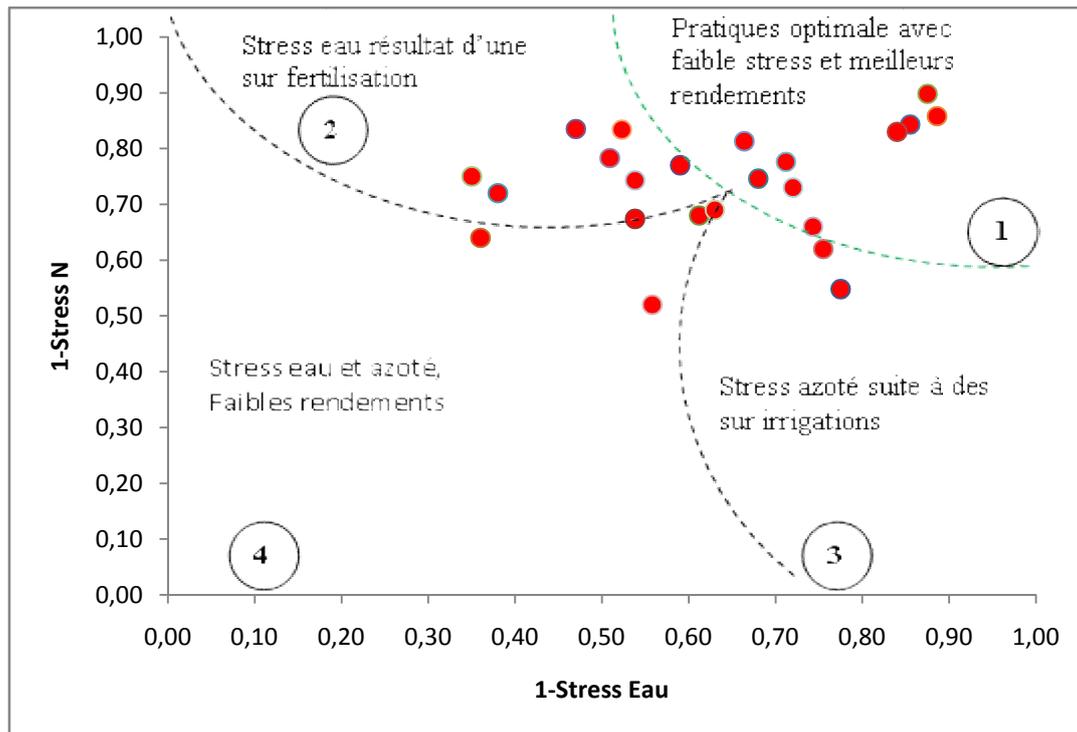


Figure28 : Pratiques des agriculteurs en début de l'atelier

4.3.3 Effet des apprentissages sur l'évolution des pratiques de fertigation des agriculteurs

Afin de présenter l'influence de l'approche de simulation participative sur les pratiques de fertigation, nous avons visualisé l'évolution des niveaux de stress en eau et azote au fur et à mesure des tours de la simulation sur la figure 29. Les couleurs représentent les éléments suivants : en rouge, les agriculteurs qui ont maintenu leurs pratiques de fertigation, i.e. pas de changement dans l'état des stress ; en vert, les agriculteurs ayant changé au moins une de leur pratique (irrigation ou fertilisation).

Afin de mieux illustrer ces changements, trois cas aux trajectoires distinctes sont représentés sur la Figure 29 par les couleurs bleu, jaune et noir respectivement.

En bleu, il s'agit d'un exemple d'un agriculteur ayant uniquement changé sa pratique d'irrigation ; ceci lui a permis de diminuer le stress en eau et ainsi, d'augmenter la valeur (1-Stress Eau) sur l'axe des abscisses au fil des tours de la simulation. Le point jaune représente le cas d'un agriculteur qui a changé uniquement sa pratique de fertigation et ce, lors du deuxième tour ; l'agriculteur a ainsi augmenté la valeur (1-Stress N) sur l'axe des ordonnées. Le dernier cas (couleur noire) est un agriculteur qui a changé les deux pratiques au même temps, ce qui donne une trajectoire linéaire oblique comme le montre la figure 29. L'agriculteur augmente la valeur de (1-Stress Eau) et (1-Stress N) de façon simultanée.

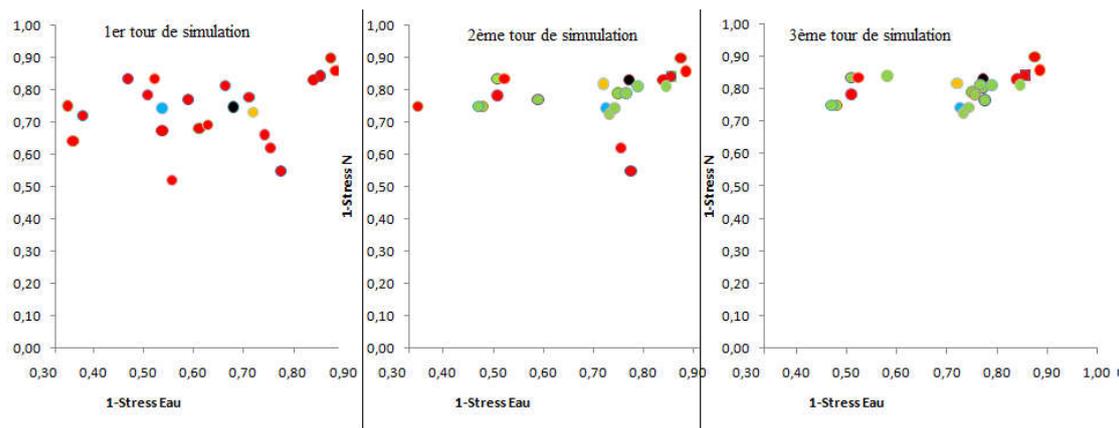


Figure 29 : Evolution des pratiques de fertigation des agriculteurs

La Figure 29 indique qu’après deux tours de simulation participative, les pratiques de fertigation évoluent suivant une trajectoire convergente, par rapport à une situation initiale de divergence des pratiques (cf. Figure 28).

Il est observé également que cette convergence se fait en deux temps distincts (au tour 2 puis au tour 3) ; le nombre d’agriculteurs qui changent de pratiques est différent à chaque tour de la simulation.

4.3.4 Analyse qualitative des es pratiques des agriculteurs et effets sur les rendements, le premier tour de l’atelier

A travers cette approche participative, le processus d’apprentissage prend comme départ les pratiques réelles des agriculteurs. Le fait de demander à l’agriculteur de s’exprimer sur sa propre pratique permet de l’impliquer dès le démarrage dans le processus d’apprentissage interactif.

A partir de là, et suite à un premier tour, nous constatons une divergence dans les pratiques des agriculteurs participants. Cette divergence des pratiques est principalement justifiée parla capacité d’accès aux différents facteurs de production, dont l’eau et l’engrais (cf. chapitres précédents).

Dans cette première partie de la simulation, les participants ont questionné les différences observées entre eux en termes de rendements. En se basant sur les enseignements tirés à partir de la modélisation avec Pilote-N et qui nous a permit de mener une analyse détaillée des pratiques des agriculteurs et l’effet sur le rendement dans les précédents chapitres de la thèse. Ceci consiste à définir l’effet des apports d’eau et d’engrais en quantités excessives dans des périodes données du cycle (pertes par drainage et lessivage), et en quantités insuffisantes dans

d'autres périodes (stress hydrique et azoté) se traduisant ainsi par des chutes dans les valeurs de rendement de la culture.

Ces enseignements ont été communiqués aux participants, en donnant des exemples réels à partir des cas simulés. Quelques pratiques courantes et souvent appliquées par les agriculteurs, conduisent à des chutes de rendement. Ces pratiques étaient présentes dans les simulations et ont été expliquées aux agriculteurs, par exemple l'irrigation avec des doses importantes espacées dans le temps. Les agriculteurs, et surtout durant la période où la demande climatique en eau est faible, optent pour irriguer une fois par dix à quinze jours et avec une dose importante. Vu la nature drainante des sols, et la faible profondeur racinaire de la culture (maximum 50 cm) une importante partie de l'eau apportée est perdue par drainage, conduisant ainsi à une phase de stress hydrique qui conduit à une réduction de la production de fruits par plante.

Une autre pratique a été mise en discussion : les quantités d'engrais appliquées par irrigation (la dose) et l'intervalle de temps entre deux apports d'engrais (la fréquence). Il a été démontré que l'apport d'engrais en quantités importantes par serre pendant une irrigation augmente les pertes par lessivage. Cette situation a été comparée à celle où les apports d'engrais par irrigation sont moindres en quantités, mais répétés plus souvent (fréquence élevée) ; les rendements constatés s'avèrent meilleurs et les pertes par lessivage sont, par conséquent, moindres.

4.3.5 Application des effets constatés par l'apprentissage au deuxième tour

Avant de lancer le deuxième tour des simulations, nous avons demandé aux agriculteurs participants de remplir de nouveau les calendriers de fertigation, avec une prise en compte des effets des pratiques précédentes sur les rendements.

Au cours de cette phase de la simulation, les réactions ont varié d'un participant à un autre. On peut ainsi distinguer deux catégories d'agriculteurs parmi les participants : la première s'intéresse aux résultats en termes de rendement que peut donner un changement de calendrier de fertigation, ce sont des agriculteurs réceptifs et susceptibles de mobiliser les apprentissages issus du processus ; à l'inverse, la seconde catégorie regroupe d'anciens agriculteurs refusant de s'impliquer dans le processus et préférant maintenir leurs pratiques de fertigation. Cette catégorie représente les agriculteurs les plus anciens et aussi les plus expérimentés de notre

échantillon, ils sont reconnus pour leur bonne maîtrise des pratiques. Ils obtiennent les meilleurs rendements. En fait, ils n'acceptent pas qu'on leur donne la posture d'un apprenant.

4.3.6 Analyse des réactions des agriculteurs

a) Les agriculteurs sensibles à la démarche

Cette catégorie de participants s'est directement projetée dans les calendriers en commençant à réfléchir à une nouvelle conduite de fertigation prenant en compte les effets de stress en eau et en azote sur le rendement.

Sur un total de 23 agriculteurs participants, 13 agriculteurs ont ainsi proposé de nouveaux calendriers de fertigation (figure 30) au second tour de la simulation.

De façon plus précise, neuf de ces treize agriculteurs ont modifié leurs calendriers de fertigation (irrigation et engrais), avec un changement plus significatif sur l'eau que sur l'azote. Deux agriculteurs ont changé la pratique d'irrigation seulement ; les deux autres ont changé la fertilisation seulement. Il est à signaler que tous ces changements ont été effectués afin de diminuer le stress et d'augmenter les rendements.

L'analyse des pratiques montre ainsi une baisse globale des apports d'eau et d'azote, appliquée de façon distincte sur chacune des composantes. Les agriculteurs ont nettement diminué les quantités d'eau, jusqu'à 140 mm pour certains, soit près de 20% de réduction par rapport au premier tour. En revanche, les agriculteurs sont restés plus modérés dans les changements d'apports d'azote avec tout au plus, 10% de diminution par rapport à la quantité totale d'azote apportée pendant le premier tour. Dans leur logique, la fertilisation influence le plus le rendement, de ce fait, il n'est pas question de réduire la quantité d'azote à fournir durant un cycle.

L'affichage des résultats de rendements a montré que, malgré ces diminutions d'apports en eau et en engrais, les rendements de la tomate par serre ont augmenté pour la plupart d'entre eux (10 sur 13 agriculteurs). Chez trois agriculteurs, les rendements ont légèrement baissé. Cette baisse est due à la persistance d'un des deux stress d'eau et d'azote (ou les deux). Mais en contre partie, les quantités de pertes d'eau et d'azote ont significativement diminué.

Cette augmentation de rendement est justifiée par une diminution du double stress exercé sur la plante. A travers leurs nouveaux calendriers de fertigation, les agriculteurs ont su éviter ces effets de stress en choisissant des irrigations plus fréquentes avec des temps d'irrigation et des doses de fertilisants moins importants. Ceci conduit à une diminution globale importante des apports en eau à la fin du cycle et reflète ainsi l'effet sur le rendement de l'optimisation des

pratiques par diminution des apports, par conséquent diminution des pertes d'eau par drainage et d'engrais par lessivage.

La figure 30 présente les changements opérés par les agriculteurs et les effets sur l'efficience agronomique à la suite du deuxième tour de la simulation. A partir de la situation initiale où seulement huit agriculteurs étaient en « zone 1 », on observe 14 agriculteurs dans cette « zone 1 » après le deuxième tour ; ces agriculteurs ont des pratiques optimales et peuvent obtenir des rendements qui dépassent les 35 Qx/serre.

Dans la « zone 2 », caractérisée par un stress en eau dominant, apparaissent 7 agriculteurs. Parmi eux, trois ont maintenu leurs pratiques de fertigation entre le premier et le second tour ; cinq les ont modifiées et sont désormais en « zone 1 », grâce à une baisse des valeurs de stress hydrique et azoté. Cinq autres agriculteurs en « zone 4 » au premier tour se retrouvent dans la « zone 2 » après le deuxième tour.

Pour les « zones 3 et 4 », en partant de sept agriculteurs au premier tour des simulations, deux agriculteurs seulement restent à l'issue du second tour, et plus précisément dans la zone 3, caractérisée par une dominance du stress azoté. Ces deux agriculteurs ont choisi de maintenir leurs pratiques initiales de fertigation ; les autres les ont modifiées et se retrouvent ainsi en « zone 2 ».

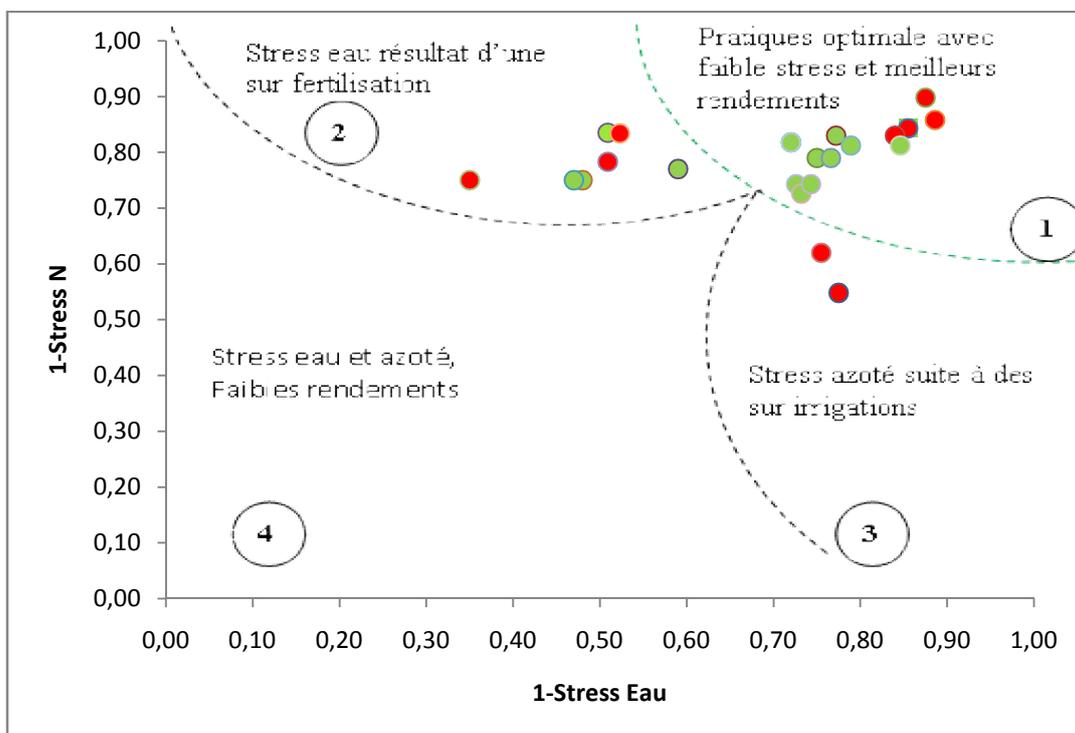


Figure 30 : Pratiques des agriculteurs après le deuxième tour

b) *Les agriculteurs n'ayant pas modifié leur pratiques*

Une deuxième catégorie est observée, il s'agit des agriculteurs les plus expérimentés (anciens) dans la plasticulture. Ces agriculteurs se sont moins impliqués dans la démarche, contrairement aux jeunes agriculteurs avec qui les ateliers étaient plus dynamiques. Parmi ces agriculteurs expérimentés, quatre agriculteurs ont affiché les meilleurs rendements pendant le premier tour de la simulation. Avec ces résultats « exemplaires », ces agriculteurs se sont considérés comme des « référents » par rapport aux autres agriculteurs. Pour eux, être dans de tels ateliers d'apprentissage est plutôt pour partager leur expertise 'd'usage' que pour être apprenant.

Dans ce groupe d'agriculteurs « anciens », deux autres affichaient toute fois des rendements moyens liés à un stress azoté très significatif. Ceux-ci ont néanmoins préféré maintenir leurs pratiques. Ils n'étaient pas réceptifs au processus d'apprentissage.

4.3.7 Au troisième tour, un apprentissage par l'observation des effets du 2^{ème} tour chez le voisin

Pendant les quatre ateliers et lors du débat qui a suivi le deuxième tour, le lien établi entre l'amélioration des pratiques et les gains en rendements a intéressé une partie des agriculteurs n'ayant pas modifié leurs pratiques au deuxième tour. En observant l'amélioration des rendements chez les voisins, ces agriculteurs ont à leur tour souhaité reformuler leurs pratiques pour le troisième tour afin de voir l'impact sur les rendements les concernant.

Dans cette troisième étape de la simulation, quatre agriculteurs ont effectué des changements sur leurs calendriers. Deux d'entre eux ont changé à la fois le calendrier d'irrigation et de fertilisation, les deux autres ont uniquement changé leur apport d'azote. Il est important de noter que ces agriculteurs ont constaté une évolution dans leurs rendements.

La figure 31 présente une évaluation faite après l'étape finale de la simulation participative. Les quatre agriculteurs ayant modifié leurs pratiques d'irrigation et de fertilisation se retrouvent ainsi dans la « zone 1 » alors qu'ils apparaissaient au tour d'avant dans la « zone 2 ». Pour les deux autres ayant uniquement modifié la fertilisation, ils sont passés de la « zone 3 » à la « zone 1 ».

A l'issue des trois tours de la simulation participative, les 18 agriculteurs en « zone 1 » ont des pratiques optimales et les meilleurs rendements du groupe, contre 8 agriculteurs dans cette zone au démarrage. On observe 5 agriculteurs en « zone 2 » contre 8 après le premier tour.

Enfin, par rapport aux 7 agriculteurs observés en « zones 3 et 4 » au début de la simulation, plus aucun n'y est observé.

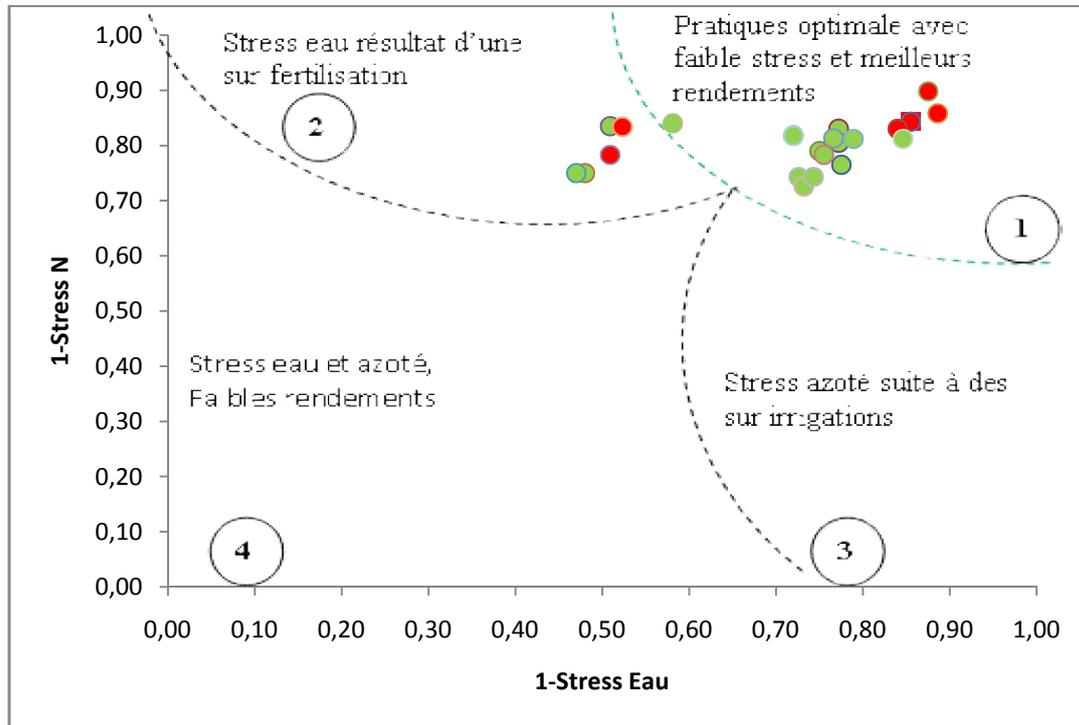


Figure 31 : Pratiques des agriculteurs après le 3^{ème} tour de l'atelier

4.3.8 La simulation participative, un processus d'apprentissage interactif pour une amélioration des pratiques de fertigation

Le dernier atelier de restitution a permis de mettre en débat l'approche de simulation participative engagé comme moyen de conseil agricole avec les acteurs de terrain. Comme expliqué dans la partie méthodologie, nous avons introduit la question du conseil agricole à travers la démarche de photo-participation. La figure 32 récapitule ainsi le nombre de photos classées en fonction des six axes déjà définis à savoir : ressources, pratiques, technologie, infrastructure, appui/conseil et commercialisation.

Les axes les plus concernés correspondent : 1) aux pratiques agricoles, 2) au conseil agricole.



Axe	Ressources	Technologies	Pratiques	Appui et conseil	Infrastructure	Commercialisation
Nombre de photos	6	3	8	7	2	4

Figure 32 : Répartition des photos choisies sur les axes définis

Ceci confirme notre hypothèse sur les problématiques les plus importantes rencontrées par les agriculteurs, à savoir l'accompagnement et le conseil d'une part, et les pratiques en général d'autre part (plus particulièrement, les pratiques de fertigation). Ce manque d'accompagnement à l'échelle du terrain est exprimé par un agriculteur participant comme suit: *'la raison de notre présence ici dans le cadre de la préparation d'une thèse sur le conseil agricole, confirme bien le fait que nous manquons d'accompagnement'*.

Les agriculteurs obtiennent régulièrement du conseil auprès des grainetiers au moment de l'achat des intrants. Sauf que leur crédibilité est conditionnée par l'intérêt commercial lié à ce type de conseil, selon les agriculteurs

Un grand effort est fourni par les institutions relevant du Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche Algérien (MADRP), notamment celles impliquées localement dans la vulgarisation, tel que l'Institut Technique de Développement de l'Agriculture Saharienne (ITDAS) de Biskra. Des cadres représentants de l'ITDAS étaient présents au cours de cet atelier de restitution. Leur modèle de vulgarisation a été présenté. Pour eux, *'le conseil est la colonne vertébrale de l'agriculture'*. Ce modèle commence par l'expérimentation dans les stations dédiées à cet effet ; les résultats obtenus à l'aide de modèles de pilotage de l'irrigation permettent de proposer des calendriers d'irrigation

économiques en eau. Ces derniers sont ensuite transcrits sur des supports techniques de vulgarisation destinés aux agriculteurs. Également, des journées d'études et de portes ouvertes au profit des agriculteurs sont souvent réalisées au sein de l'établissement. Ce modèle retrace bien le cheminement de la méthode d'apprentissage linéaire décrit par Papy (2004). Dans ce modèle, l'agriculteur vient en fin de processus ? Dans ce modèle d'apprentissage, l'agriculteur semble ne pas trouver des solutions adaptées à son contexte en particulier. Selon un représentant de l'ITDAS, cela s'explique par la méfiance de l'agriculteur face aux informations non applicables pour ses propres conditions, il rajoute : *'l'agriculteur doit voir l'effet de la pratique portée par le conseiller avec ses yeux, la toucher avec ses mains'*.

Par ailleurs, un autre agriculteur a évoqué le manque de confiance et la question de la crédibilité de l'expertise portée par l'agent de conseil ; il s'est exprimé sur une expérience vécue et au cours de laquelle il a perdu une partie de sa production. *'Le conseiller agricole ne partage pas la perte avec vous, il n'assume pas !'*.

Notre interprétation est qu'il manque un maillon entre les organismes de conseil et de vulgarisation et les agriculteurs. D'un côté, l'institution mise, sur l'expérimentation en conditions particulières à travers un travail important, et d'un autre, l'agriculteur exige une qualité de conseil caractérisée par des pratiques efficaces aux effets immédiats sur le rendement.

L'approche que nous avons conçue s'inscrit parfaitement dans cette logique, puisque la simulation participative vient combiner : 1) les approches de modélisation qui visent l'amélioration des pratiques de fertigation des agriculteurs ; et 2) le besoin en accompagnement technique sans intérêt commercial réclamé par l'agriculteur. Ces derniers exigent un accompagnement qui prend en considération les conditions réelles du terrain et qui assure des effets sur le rendement.

A travers les ateliers de simulation participative faits sur le terrain, nous avons observé que 75% des participants modifient leurs pratiques de fertigation entre le début et la fin des ateliers, à la faveur d'un constat immédiat de l'effet de la pratique sur le rendement. L'implication de l'agriculteur comme partie prenante du processus l'apprentissage a rendu efficace ce dernier.

Comme mentionné en introduction, l'agriculteur croit à ses observations et cette manière simulée de visualiser les effets des pratiques, sans incidence négative, lui a permis de repenser la manière dont il conduit ses cultures.

4.4 Conclusion

Notre point de départ pour ce chapitre de la thèse était le diagnostic de l'actuel mode de transfert de savoir en fertigation entre les agriculteurs de notre terrain. De ce transfert de savoir résulte une maîtrise empirique des pratiques de fertigation en goutte à goutte co-construites localement, mais en l'absence de références scientifiques, ce que nous appelons une « expertise d'usage ».

En parallèle, l'agriculteur est en position de « simple apprenant » dans un modèle de vulgarisation agricole qualifié de linéaire. Par ailleurs, certains agriculteurs de notre zone d'étude ont exprimé le manque d'accompagnement. Malgré les efforts fournis par les institutions étatiques de vulgarisation pour produire des connaissances, le mode de diffusion selon le modèle linéaire a montré ses limites.

Notre approche s'appuie sur l'hypothèse qu'une bonne approche d'apprentissage visant l'agriculteur doit réunir les trois aspects suivants : 1) partir des pratiques réelles, 2) l'agriculteur est un partenaire à part entière dont l'expertise d'usage est reconnue au même titre que l'expertise technique et l'expertise scientifique et 3) un retour rapide des effets des pratiques sur les rendements rend l'activité de vulgarisation agricole efficace dans le contexte de notre étude.

Trois comportements se distinguent suite à l'utilisation de l'approche de simulation participative avec les agriculteurs de notre terrain. Le premier comportement reste relativement neutre par rapport au processus d'apprentissage ; il s'agit d'agriculteurs âgés et plus expérimentés, ils ont suivi les règles sans participer activement dans le débat ; la deuxième catégorie est représentée par de jeunes agriculteurs très dynamiques, leur interactivité avec les animateurs était telle qu'ils ont pris la position de « transmetteur de savoir » envers un troisième groupe d'agriculteurs. Ces derniers sont qualifiés de « simple apprenant » ; leurs pratiques ont significativement évolué durant les ateliers.

La force de la démarche présentée dans ce chapitre réside dans son caractère pédagogique innovant. Elle repose sur la traduction et la simplification des concepts scientifiques de besoins en eau et en azote des cultures à des pratiques mises en œuvre quotidiennement par les agriculteurs. Cet atout est réalisé à travers la mobilisation des outils participatifs impliquant pleinement l'agriculteur dans le processus d'apprentissage. La perception des effets est le deuxième aspect utilisé dans cette démarche, vu que cela constituait une limite du

modèle linéaire. La combinaison des deux aspects a permis de créer une approche par simulation participative des pratiques de fertigation des agriculteurs.

Ce travail enrichira davantage les outils d'apprentissage à mettre en œuvre pour améliorer les pratiques des agriculteurs, par le croisement des pratiques réelles et des connaissances scientifiques.

Une recommandation issue de ce travail serait de co-construire un observatoire des pratiques agricoles en plasticulture réunissant les agriculteurs, les professionnels et les institutions, qui constituerait un lieu d'échange, de partage d'expertise et aussi d'apprentissage, en particulier pour les nouveaux praticiens de la filière.

Chapitre 5

Conclusion Générale

Chapitre 5 : Conclusion générale

La présente thèse avait pour objectif d'élaborer et de mettre en œuvre une approche méthodologique innovante et participative pour analyser la performance de l'irrigation et de la fertigation de la technique de goutte à goutte dans les conditions réelles des agriculteurs pratiquant le maraichage sous serre dans la région d'El Ghrous. Ceci a mis en lumière les logiques des pratiques réelles des agriculteurs, la diversité de leur expertise d'usage, et les possibilités d'amélioration.

Les agriculteurs de la zone d'étude d'El Ghrous à Biskra utilisent la technique de goutte à goutte pour irriguer leurs cultures maraichères sous serres. Au cours des vingt dernières années, cette région a connu un développement important de la « plasticulture », et la technique d'irrigation en goutte à goutte a contribué à ce développement. Actuellement toutes les serres sont irriguées en goutte à goutte qui est adapté au contexte local et est utilisé par une diversité d'acteurs dont une bonne partie vient du nord de l'Algérie (Amichi 2018 ; Naouri 2019). Au cours des années d'exercice, les agriculteurs ont acquis une certaine maîtrise de la gestion des besoins en eau et en fertilisants des cultures maraichères que nous appelons expertise d'usage. Cependant cette expertise est variable d'un agriculteur à l'autre, ce que la diversité des rendements en maraichage traduit par une variation du simple au double (de 55 à 110 tonnes/ha).

Pour la période qui s'étale de 2013 et 2018 et qui correspond aux années de préparation de cette thèse, nous avons mené de nombreuses enquêtes de terrain. L'objectif était de schématiser la manière par laquelle cette maîtrise des pratiques de fertigation (gestion de l'eau et des fertilisants) été pratiquée par les agriculteurs travaillant dans les serres, qu'ils soient propriétaires, locataires ou métayer. Nous avons constaté que cette expertise d'usage résultait de la conjugaison de trois modes d'apprentissage locaux à savoir : l'expérience individuelle, les interactions entre les agriculteurs et les interactions avec les grainetiers (avec ce qu'on appelle la vente conseil). Ces trois formes d'apprentissage sont prédominantes. De l'autre côté, les institutions publiques chargées de la vulgarisation adoptent une méthodologie dont le modèle est qualifié par Joly (2004) sous le terme de « modèle linéaire ». Papy(2004) a décrit son cheminement comme suit : production de l'information par le chercheur, test d'adaptation à différentes situations, promotion par les vulgarisateurs, adoption par quelques exploitations pilotes et enfin diffusion à grande échelle. Dans ce processus, l'agriculteur ne constitue pas une partie-prenante et les solutions sont souvent mal adaptées aux conditions réelles du terrain

(voir la figure 5 dans l'introduction). Nous avons remarqué que sur le terrain de l'étude, la contribution et l'impact du modèle linéaire était faible.

Notre deuxième conclusion porte sur le fait que le modèle interactif local, tel qu'il existe sur le terrain aujourd'hui (figure 5), a bien prouvé son efficacité, mais qu'il est possible d'améliorer les performances de la fertigation. Ceci s'explique par la création de normes locales en termes de doses d'irrigation et de fertilisation qu'on peut vérifier partout où on se rend sur le terrain. Son efficacité est justifiée également par l'alternance entre deux concepts, le premier consiste à l'expérimentation à l'échelle de la parcelle établie généralement par des agriculteurs référents qui sont souvent orientés par les vendeurs d'intrants (grainetiers). Ces derniers et à leur tour, fournissent le résultat de ces expériences aux agriculteurs clients afin de les encourager à commander davantage d'intrants de chez eux. Et enfin, les agriculteurs apprenants expriment à leur tour leurs retours d'expériences avec les agriculteurs voisins et aussi aux grainetiers. Ce schéma correspond au second modèle de vulgarisation qualifié par Papy (2004) comme le modèle interactif. C'est le schéma dominant dans le terrain d'El Ghrous. Ce modèle a prouvé jusqu'ici son efficacité, l'agriculteur est dans ce cas au centre du processus de production et de diffusion de l'information.

L'approche que nous avons adoptée dans cette thèse mobilise dans une grande partie le principe de l'interactivité, en nous appuyant sur le modèle interactif de conseil agricole déjà existant. Mais en même temps, nous avons établi par nos mesures, nos observations et notre approche de modélisation, qu'il était tout à fait possible de contribuer, en tant que scientifique, à l'amélioration des pratiques (meilleure application de l'eau, diminution des doses de fertilisants, etc.) et des performances de la fertigation. Il s'agissait alors d'élaborer une démarche pour analyser et améliorer ces performances, en faisant participer des agriculteurs avec des expertises d'usage diversifiées dans un processus d'apprentissage mutuel. Le chercheur améliore ses connaissances dans ce processus, l'agriculteur son savoir-faire.

Notre démarche est basée sur les trois axes suivants et dans lesquels l'agriculteur participe activement : 1) l'analyse conjointe des mesures et des observations de la fertigation en élaborant des indicateurs de performance partagés, 2) l'évaluation par la modélisation des pratiques et de leur performances hydraulique, agronomique et environnementale, et 3) la mise en discussion des pratiques et des voies d'amélioration par la simulation participative.

5.2 Se servir des connaissances empiriques des agriculteurs pour produire des indicateurs de performance à mesurer

L'analyse des performances de l'irrigation exige une bonne compréhension des pratiques d'irrigation des agriculteurs ainsi que des logiques derrière ces pratiques, comme le préconisent des auteurs tels que Tanji et Keyes (2002), Luquet et al. (2005) et Benouniche et al. (2014). Dans la littérature, de nombreux indicateurs d'évaluation de la performance d'irrigation en goutte à goutte sont proposés, l'apport de notre approche réside dans le fait qu'elle confronte l'indicateur technique universel aux connaissances, savoir-faire et intérêts des acteurs locaux (Bouleau, 2006). L'uniformité de distribution et le niveau de stress hydrique font référence à différents concepts permettant une meilleure évaluation des performances d'irrigation.

L'entretien permanent de l'installation de goutte à goutte par l'agriculteur révèle sa perception de l'importance de l'homogénéité de distribution de l'eau dans la serre. Afin de la maintenir dans une fourchette acceptable, les agriculteurs procèdent régulièrement à une opération de nettoyage des gaines de goutte à goutte, en particulier après des applications répétées d'engrais par la fertigation. L'atteinte d'un seuil d'une mauvaise répartition de l'eau à l'intérieur de la serre conduit certains agriculteurs à changer complètement les gaines de goutte à goutte même si la culture est toujours en place. Les résultats ont montré que les agriculteurs veillent à maintenir les valeurs du coefficient d'uniformité (CU) comprises entre 0,6 et 0,85.

Contrairement à ce que considèrent implicitement Karmeli et Keller (1974), les valeurs de l'uniformité de distribution ne sont pas statiques. Nos résultats montrent que ces dernières sont très dynamiques au cours même d'une campagne agricole. L'autre apport méthodologique de notre approche est que la manière dont l'uniformité de distribution évolue au cours d'un cycle cultural constitue en elle-même un indicateur de la performance. L'entretien opéré par l'agriculteur pour son installation de goutte à goutte lui permet d'assurer une bonne évolution de son uniformité de distribution, par conséquent, une meilleure satisfaction des besoins en eau et en fertilisants de toutes les plantes à l'échelle de sa serre. L'agriculteur mobilise cet indicateur de performance afin d'assurer une bonne production.

Dans l'objectif de s'informer sur la conduite de l'irrigation chez l'agriculteur, la littérature propose la notion de l'apport d'eau relatif (Relative Water Supply) qui se définit par le rapport entre les apports d'eau les besoins de la culture à l'échelle d'un cycle cultural (Levine 1982 ; Sakthivadivel et al., 1992). Cet indicateur représente une valeur moyenne, statique de l'état du

confort hydrique d'une culture donnée dans la globalité de son cycle. Cette valeur moyenne ne montre pas l'évolution de l'état de satisfaction des besoins en eau le long du cycle cultural. Dans notre approche, nous avons proposé d'évaluer la pratique d'irrigation en utilisant l'indice de stress hydrique (Water Stress Level WSL) généré par la pratique d'irrigation au cours d'un cycle. La mise en discussion de cet indicateur présente un intérêt direct pour l'agriculteur car ce dernier considère le stress hydrique comme source de baisse de rendement. Dans sa pratique quotidienne, il gère le stress hydrique de sa culture.

Dans cette thèse, notre posture « impliquée », c'est à dire construire de façon participative un dialogue continu avec les acteurs locaux, a été adoptée dès le début des enquêtes. Les agriculteurs nous ont conduits à nous inspirer des indicateurs de performance qu'ils utilisent eux-mêmes dans leurs conduites culturales. Ceci nous a amené à s'intéresser, en plus de la pratique d'irrigation, à l'évaluation de la manière d'apporter les engrais aux cultures par la fertigation. La logique des agriculteurs dans la gestion conjuguée de l'eau et l'engrais a influencé le choix des indicateurs dans cette thèse, et l'a orientée vers une évaluation de la performance agronomique de la fertigation avec considération de la production de la culture sous serre (productivité de l'eau et de l'azote). Cette analyse a été confrontée à une évaluation de la productivité à l'échelle de la serre des deux composants eau et engrais dans le cas de la tomate.

Il a été conclu que les apports d'eau et d'azote de ces agriculteurs (pour 90% des cas) dépassent les besoins de référence de cette culture. Cette analyse a montré que ces pratiques de fertigation engendraient des phases de stress abiotique. Ces phases les plus importantes sont à l'origine des rendements les plus faibles (550 Qx/ha).

Les agriculteurs peuvent améliorer leur rendement en réduisant l'occurrence des phases de stress pendant le cycle cultural en adoptant un calendrier des apports adéquat. Ceci leur permet, avec les mêmes apports d'eau et d'azote, de valoriser au mieux la productivité de ces deux composants, les meilleures pratiques de fertigation permettent d'atteindre le seuil de 1100 Qx/ha.

Le réflexe des agriculteurs quant aux phases de stress en eau en azote constitue l'élément stimulateur de son calendrier de fertigation, la mobilisation de ces indicateurs dans l'analyse des pratiques explique les niveaux de performance des agriculteurs.

5.3 La modélisation pour montrer les effets des pratiques sur les rendements, comprendre l'influence des logiques de fertigation sur la performance agronomique des systèmes de cultures sous serres

Le besoin d'identifier dans un premier temps les phases de stress résultant des pratiques de fertigation des agriculteurs, et de montrer, dans un deuxième temps, les effets de ces phases de stress d'eau et d'azote sur le rendement, nous a conduit à utiliser la modélisation dans cette thèse.

Deux modèles de cultures sont mobilisés, le premier est le modèle Aquacrop développé par la FAO (Steduto et al., 2007, 2009) ; le deuxième est le modèle PILOTE-N développé par l'IRSTEA (Mailhol et al., 2018). Le premier modèle a été mobilisé pour simuler l'efficacité hydraulique des pratiques d'irrigation des agriculteurs, sans considérer l'application des fertilisants, et pour une diversité de cultures maraichères (tomates, piment, poivrons, aubergine, concombre, courgettes et melon). Le deuxième modèle nous a permis d'analyser les pratiques conjuguées de fertigation uniquement pour la tomate dans un objectif de simulation agronomique et d'impact environnemental.

A quoi nous a servi la modélisation dans ce travail de recherche ? Nous présentons dans les éléments suivants la contribution de la modélisation dans cette thèse.

Simulation des stress en eau et en azote

Grâce à la possibilité de calculer les besoins en eau journaliers des cultures, les modèles ont servi de référence et ont ensuite permis de situer les pratiques des agriculteurs par rapport à cette norme. Les coefficients de stress d'eau et d'azote sont ainsi calculés.

Simulation des effets des pratiques de fertigation sur les rendements

Avec la possibilité de simuler les rendements, nous avons pu, à travers l'analyse des différents calendriers de fertigation, estimer l'influence des stress en eau et en azote sur les pertes de rendement. Les simulations ont montré que le stress azoté est plus impactant sur le rendement que le stress hydrique. Par exemple, une baisse de 12 T/ha de rendement pour une différence de taux de stress azoté de 3% et pour un même niveau de stress en eau, tandis qu'une différence de 10 T/ha est enregistrée pour une différence de 7% en stress hydrique et un même niveau de stress d'azote. Quoi qu'il en soit, nous avons pu quantifier que le stress abiotique était à l'origine des pertes de rendement, ceci ne pourrait être identifié sans l'utilisation de la modélisation.

Simulation des pertes d'eau et d'engrais

Un des enseignements que l'on peut tirer de la modélisation, c'est la capacité des modèles à quantifier les pertes engendrés par une irrigation ou fertilisation excessives durant une ou plusieurs périodes du cycle culturale. Ceci représente la dimension environnementale liée à l'utilisation des modèles de cultures. Nous avons ainsi pu mettre en évidence certaines pratiques pour lesquels les performances agronomiques et environnementales étaient très proches de l'optimum (rendement de 110 tonnes/ha et pertes minimales) tandis que d'autres agriculteurs perdaient jusqu'à 30 % et 25 % de l'eau et de l'azote apportée respectivement.

La modélisation nous a ainsi permis d'approfondir nos connaissances sur l'effet des pratiques sur les performances de fertigation et de comprendre l'origine des sources de pertes de rendements. Aussi, la modélisation nous a permis d'identifier des voies théoriques d'amélioration des pratiques. Cependant, si ces connaissances restent strictement dans le domaine scientifique, aucune amélioration significative ne pourra se réaliser. Nous nous sommes ainsi engagés dans la troisième partie de notre démarche qui a consisté à concevoir un dispositif de simulation participative des pratiques de fertigation en vue de leur amélioration.

5.4 La simulation participative pour l'amélioration des pratiques : transformer le modèle linéaire d'apprentissage en un modèle interactif multi-acteurs.

Notre approche est basée sur l'hypothèse qu'une bonne méthode d'apprentissage pour l'agriculteur doit réunir les conditions : 1) de partir des pratiques réelles, 2) de participation à part entière de l'agriculteur et 3) d'une estimation en temps réel grâce aux connaissances scientifiques des effets des pratiques sur les rendements. Cette approche a pour objectif de conduire une réflexion sur des méthodes innovantes en termes de conseil agricole. Pour concrétiser ce défi méthodologique, nous avons conçu une méthode d'apprentissage par simulation participative. La partie simulation du bilan eau, azote et rendement, est assurée par le modèle PILOTE-N calé au contexte de l'étude. La participation a concerné les acteurs identifiés sur le terrain (agriculteurs, grainetiers, vulgarisateurs) comme étant des intervenants direct ou indirect dans le développement et la maîtrise de la technique de goutte à goutte.

D'un point de vue méthodologique, ce travail a nécessité un travail préparatoire pour simplifier l'usage du modèle scientifique pour un usage simple, compréhensif et en temps réel en séance. Grâce au calage du modèle PILOTE-N aux conditions locales de terrain, il a été possible de définir à priori des scénarios de fertigation en affectant à chaque scénario la valeur

du rendement associé ainsi que les quantités perdues d'eau et d'engrais. Ceci nous permettra de générer les calendriers de fertigation-types qui permettent d'atteindre des meilleurs rendements et avec moins de pertes d'eau et d'engrais. Grâce au retour rapide des effets des calendriers proposés, la modélisation constituera un instrument efficace à engager dans un travail participatif d'apprentissage des pratiques de fertigation.

La force de l'approche présentée dans cette thèse réside dans le fait qu'elle soit un outil pédagogique destinée aux agriculteurs qui opèrent directement le système de goutte à goutte. Ceci articule l'utilisation des concepts scientifiques de besoins en eau et azote des cultures (maîtrisé par le scientifique et l'ingénieur) à des pratiques utilisées quotidiennement par les agriculteurs. De plus, la démarche est construite de manière interactive : elle vise à i) impliquer l'agriculteur dans le processus d'apprentissage, ceci permet à l'agriculteur de proposer de nouvelles pratiques ou même de défendre ses pratiques, et ii) impliquer les scientifiques et les conseillers dans ce même processus, ceci leur permet de mieux comprendre les enjeux de la fertigation pour les acteurs et de contribuer à améliorer le modèle interactif de conseil agricole déjà en place. Un deuxième aspect, qui constituait une limite du modèle linéaire de la vulgarisation agricole, a été utilisé dans la démarche ; c'est la perception des effets. Ceci a été assuré par la modélisation qui, et de par l'affichage instantané du rendement obtenu suite à une pratique de fertigation, permet de mettre en débat les différences de logiques des agriculteurs, et même aboutir aux pratiques types adaptées à leurs réelles conditions dans le terrain.

Trois différents comportements sont à distinguer à la suite de la mise en œuvre de l'approche de simulation participative avec les agriculteurs de notre terrain. La première catégorie est relativement neutre par rapport au processus d'apprentissage. Il s'agit des agriculteurs âgés et plus expérimentés, ils ont suivi les règles sans participer activement au débat. La deuxième catégorie représentée par des jeunes agriculteurs très dynamiques, leur interactivité avec les animateurs était remarquable au point où ils ont pris la position du transmetteur de savoir pour leurs collègues d'une troisième catégorie. Cette troisième catégorie est représentée par des agriculteurs présentant le plus fort potentiel d'amélioration et dont les pratiques ont significativement évolué durant les ateliers.

En conclusion, notre démarche de simulation participative s'est appuyée sur les ressources humaines du modèle de conseil agricole existant, tout en proposant de nouvelles méthodes et outils. Pour rappel, ce modèle s'appuie sur une expérimentation par les grainetiers chez des agriculteurs référents pour ensuite partager les résultats de l'expérimentation avec d'autres

agriculteurs. Ce modèle encourage non seulement des interactions entre grainetiers et agriculteurs, mais aussi entre agriculteurs pour le partage de leur expertise d'usage. Nous avons élargi cette démarche en conduisant d'abord une analyse *in situ* des pratiques de fertigation chez une grande diversité d'agriculteurs pour observer une large gamme de pratiques, et non seulement les pratiques des meilleurs (qui peuvent être considérés comme des référents). Ensuite, nous avons élargi la notion de l'expérimentation à une démarche de modélisation, qui permet de mieux identifier les sources de pertes de performance de fertigation et de rendements. Enfin, la simulation participative n'a pas seulement permis de confronter les connaissances scientifiques par rapport aux pratiques réelles, mais aussi d'engager un débat pluriel, entre les scientifiques, les conseillers, et les différentes catégories d'agriculteurs.

5.5 Un apport méthodologique pour évaluer la performance des pratiques agricoles : vers un observatoire des pratiques agricoles

A travers ce travail de thèse sur la performance de fertigation des agriculteurs, nous avons effectué une confrontation de notre démarche aux méthodes de la littérature en la matière. Ces dernières s'appliquent généralement sur des installations conventionnelles et dans des conditions contrôlées, et ont bien trouvé la limite de leur utilisation dans le contexte réel. Ce travail d'évaluation a concerné un mode d'irrigation qui a subi des innovations, au sens de l'adaptation d'une technique par les acteurs locaux à leur environnement. Comme l'agriculteur était au centre du processus de l'innovation de cette technique de goutte à goutte sous serre, notre hypothèse de départ reposait sur le fait qu'il doit également être au centre du processus d'apprentissage qui vise à améliorer ses pratiques. Ceci s'est traduit dans notre thèse par un travail participatif de collecte de données, de traitement et compréhension des pratiques par la modélisation, jusqu'à la mise en place d'une plateforme de simulation participative dans le but de produire les pratiques types.

Deux principaux apports de la thèse sont à noter : 1) Cette approche méthodologique a validé le schéma itératif d'apprentissage en agriculture, en concevant et appliquant cette démarche pour le cas de la fertigation sous serre. Contrairement au modèle linéaire présenté en introduction (figure 5), la figure 33 représente la manière dont nous souhaitons aborder la notion de la performance d'irrigation dans une zone d'étude donnée ainsi que les modalités à mettre en place pour ébattre les pratiques des agriculteurs. 2). Ainsi, nous avons instrumenté le modèle interactif décrit par Papy (2004) à travers la conception, en concertation avec les agriculteurs d'un outil pédagogique d'apprentissage, il s'agit du package de simulation

participative qui réunit l'usage de la modélisation à une mise en scène des scénarios de pratiques agricoles.

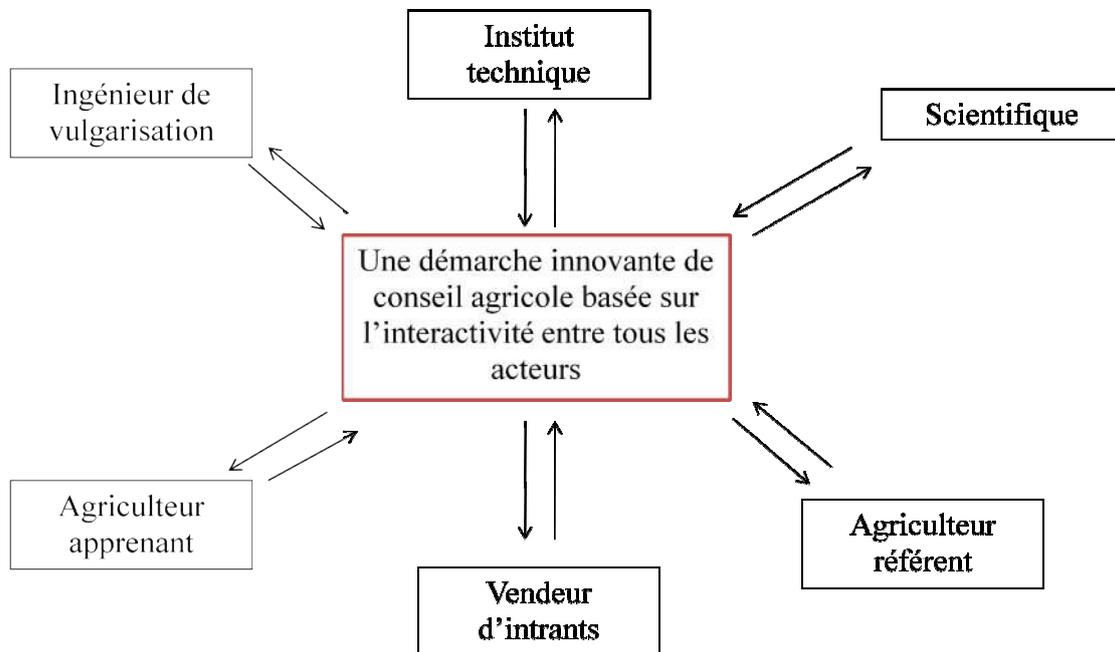


Figure 33 : Schéma du modèle d'apprentissage avec interaction entre les acteurs

En cette fin de thèse, nous posons comme perspective que le dispositif participatif mis en place pourrait préfigurer une plateforme d'innovation ouverte. Cette plateforme pourrait avoir pour vocation d'être un lieu d'apprentissage collectif au sein d'un cercle de professionnels de l'agriculture et réunissant différentes formes d'expertises (expertise d'usage, expertise technique, expertise scientifique) ouverte à tous les acteurs intéressés par l'agriculture saharienne (agriculteurs, conseillers, grainetiers, recherche...). Une telle plateforme pourrait ainsi accompagner et stimuler les initiatives d'innovation locales pour une agriculture saharienne performante d'un point de vue agricole et environnemental.

Activité scientifiques

Articles et contribution dans un livre

- Connecting drip irrigation performance to farmers' practices: the case of greenhouse horticulture in the Algerian Sahara. Laib Khalil, Hartani Tarik, Bouarfa Sami, Kuper Marcel, Mailhol Jean-Claude. 2018. *Irrigation and Drainage*, 12 p.

Communications

- Les doctoriales de l'irrigation. Journée avenir de l'eau 2017. Montpellier le 17 Mai 2017.

Présentation d'un poster intitulé: « Vers une constitution d'un Référenciel local de pratiques de fertigation avec le Goutte à Goutte sous serre. Cas de la plasticulture dans le Sahara Algérien »

- 3ème Séminaire ARENA sur la gouvernance des eaux souterraines au Maghreb - Montpellier, 11-15 octobre 2015.

Présentation d'un poster intitulé: « Prise en compte de la variabilité de la performance de l'irrigation au goutte à goutte Cas de la plasticulture dans le Sahara Algérien »

- ICID 2015 Conférence Euro-méditerranéenne sur l'irrigation: Innover pour améliorer les performances de l'irrigation. Montpellier, 11-16 octobre 2015

Présentation oral d'une communication intitulée: « Prise en compte de la variabilité de la performance de l'irrigation au goutte à goutte Cas de la plasticulture dans le Sahara Algérien »

- 2ème séminaire ARENA sur la gouvernance des eaux souterraines au Maghreb - Tunis/Kairouan, 3-6 mars 2015

Présentation d'une communication intitulée: « La maîtrise de l'irrigation à travers l'implication des acteurs locaux, un levier de développement dans une configuration d'usage collectif de la ressource au sein d'un territoire en pleine dynamique agricole de maraîchage sous serres les Ziban »

Séminaire AFEID -Rabat- Maroc - Octobre 2014 "Les Economies de l'eau dans les systèmes irrigués"

Présentation d'une communication intitulée « Performance de l'irrigation au goutte à goutte, un processus dynamique Cas de la plasticulture au Ziban »

- Séminaire euro-méditerranéen - Biskra - "La gouvernance des eaux souterraines au Maghreb" Décembre 2013

Présentation d'une communication intitulée «L'irrigation au goutte à goutte à El Ghrous : une technique et une multitude de performances. Biskra- Algérie» élaborée dans le cadre du Projet Ground WaterArena

Workshops

- Mai 2015 Lisode – Société société coopérative spécialisée dans la recherche et l'ingénierie des démarches participatives Montpellier France

Formation “Facilitation de groupe”

- Oct. 2013 Tabarka - Tunisie - Scientific writing in English

The aim of the workshop is to help you write a good scientific paper in English

Références Bibliographiques

Albasha R, Jovanovic N, Cheviron B, De Clercq W, Mailhol, J.C. 2016. Optimizing tomato water and fertilizer uses in smallholder farms in South Africa using the Piloten Model. *Irrigation and Drainage*. doi: [10.1002/ird.2071](https://doi.org/10.1002/ird.2071).

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration guideline for computing crop water requirements. FAO. *Irrigation and drainage paper*. No 56 FAO. Rome, Italy.

Agostini F, Tei F, Silgram M, Farneselli M, Benincasa P, Aller M.F. 2010. Decreasing nitrate leaching in vegetable crops through improvements in N fertilizer management. In: Lichtfouse, E (ed), *Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming (Sustainable Agriculture Review, 4)*. Springer Science+Business Media B.V., p. 147-200.

Ameur F, Hamamouche MF, Kuper M, & Benouniche M. 2013. La domestication d'une innovation technique: la diffusion de l'irrigation au goutte-à-goutte dans deux douars au Maroc, *Cahiers Agricultures*, 22, 4 : 311-318.

Amichi F, Bouarfa S, Kuper M, Caron P. From oasis archipelago to pioneering eldorado in Algeria's Sahara. *Irrigation and drainage*. doi 10.1002/ird.2308

Amichi F, 2018. Une agriculture transitoire au service d'une agriculture pérenne dans un front pionnier Saharien en Algérie : L'eldorado d'El Ghrous. Thèse de doctorat , université Agroparistech Montpellier, France et l'IAV Hassan II de Rabat, Maroc.

Amichi F, Bouarfa S, Lejars C, Kuper M, Hartani T, Daoudi A, Amichi H, Belhamra M. 2015. Des serres et des hommes : des exploitations motrices de l'expansion territoriale et de l'ascension socioprofessionnelle sur un front pionnier de l'agriculture saharienne en Algérie. *Cahiers Agricultures*, 24 : 11-19. doi : 10.1684/agr.2015.0736.

Barakat M, Cheviron B, Angulo-Jaramillo R, 2016. Influence of the irrigation technique and strategies on the nitrogen cycle and budget. *Agriculture Water Management*. 178 : 225-238.

Bendjelid Abed. 2003. Les mutations géographiques du sahara : d'hier à aujourd'hui de Jean Bisson. Paris , l'Harmattan, , 7, 479 p.

Benouniche M, Kuper M, Hammani A, Boesveld H. 2014. Making the user visible: analysing irrigation practices and farmers' logic to explain actual drip irrigation performance. *Irrigation Science* 32(6): 405-420.

Bouammar B., 2006. Le développement agricole dans les régions sahariennes : étude de cas de la région d'Ouargla et de la région de Biskra. Thèse doctorat

Bouleau G. 2006. Le débat sur la qualité de l'eau. Comment des données peuvent devenir des indicateurs. *Ingénieries - E A T*, IRSTEA édition 2006, p. 29 - 36. [hal-00601238](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00601238)

Braiki, H., Burte, J., Imache, A., Hassenforder, E., Habaieb, H., & Bouarfa, S., 2018. Expérimenter la concertation : une clé pour des politiques environnementales plus efficaces ? Une démarche multi-acteurs innovante en Tunisie centrale. *Cahiers Agricultures*, 27(1), 15003.

Braiki H, Kchouk S, Burte J, Habaieb H, Bouarfa S, 2018. Developing a platform to involve local stakeholders in the planning & implementation of multifunctional soil and water conservation works in central Tunisia. *Soil and Water Conservation*.

Bruno M, Jérôme G. 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cahiers Agricultures*, 3 : 247-57.

Burt CM, Clemmens AJ, Strelkoff TS, Solomon KH, Bliesner RD, Hardy LA, Howell TA, Eisenhauer DE. 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *Irrigation and Drainage Engineering* 123(6): 423-442.

Caneill J. 2006. Agronomes et innovations : des entretiens du pradel, 3rd éd. L'Hamattan,

Côte M. 2002. Des oasis aux zones de mise en valeur: l'étonnant renouveau de l'agriculture saharienne. *Méditerranée* 99 : 5-14.

Daoudi A, Lejars C. 2016. De l'agriculture oasisienne à l'agriculture saharienne dans la région des Zibans en Algérie : acteurs du dynamisme et facteurs d'incertitude. *New Medit*, 45-52.

De Villele O. 1974. Besoins en eau des cultures sous serre: essai de conduite des arrosages en fonction de l'ensoleillement. *Acta Horticulture*. 35: 123-135. DOI: 10.17660/actahortic.1974.35.16 (in French).

Dionnet M, Imache A, Leteurtre, E, Rougier, JE, & Dolinska, A. 2017. Guide de concertation territoriale et de facilitation. Lisode, 66p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01483862>.

Dionnet M, Daniell, KA, Imache A, von Korff Y, Bouarfa S, Garin P, Jamin JY, Rollin D, Rougier, JE. 2013. Improving participatory processes through collective simulation: use of a community of practice. *Ecol. Soc.* 18 (1), 36p.

Dolinska A. 2017. Bringing farmers into the game: strengthening farmers' role in the

innovation process through a simulation game, a case from Tunisia. *Agricultural Systems* 157 :129-139.

Dubost D, Moguedet G. 2002. La révolution hydraulique dans les oasis impose une nouvelle gestion de l'eau dans les zones urbaines. *Méditerranée* 99:15-20.

Feigin A, Ravina I, Shalhevet J. 1991. Irrigation with treated sewage effluent. Management for environmental protection. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 224 pp.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1986. *Consultation on Irrigation in Africa*. Lomo, Togo, 21-25 April 1986. Proceedings, 209p. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 42. Rome, Italy.

Girard N, Navarrete M. 2005. Quelles synergies entre connaissances scientifiques et empiriques : exemple des cultures du safran et de la truffe. 13: 33-44.

Hartz TK, Hochmuth GJ. 1996. Fertility management of drip-irrigated vegetables. *Hort Technology*. 6(3): 168-172.

Imache A, Hartani T, Bouarfa S, Kuper M. 2010. La Mitidja 20 ans après : Réalités agricoles aux portes d'Alger. Alpha design, 288p.

Isaacs Williams, Senge Peter, 1992. Overcoming limits to learning in computer-based learning environments. *Eur. J. Oper. Res.* 59 (1), 183-196.

Joly B P. 2004. Transformation de l'innovation en agriculture : une analyse basée sur les recherches en sciences sociales. In : des entretiens du Pradel, 3rd ed , *Agronomes et innovation*. L'Hamattan, p. 21-39.

Kankeu R S, Tiani A M. 2014. Guide de cartographie participative géo référencée pour la gestion communautaire du terroir. [*CIFOR Working Paper*](#) 158

Karmeli D, Keller J. 1974. Evaluation of a trickle irrigation system. In: Riverside Printers, *Proceedings of the 2nd international drip/trickle irrigation congress*. California, USA, p. 287-292.

Kessah A. 1994. Diagnostic rapide et stratégie de développement en milieu oasien : étude comparée des oasis au Maghreb et dans le monde. Cours International du 07 au 26 novembre 1994. CRDA, Tozeur, Tunisie. 1994. 23 p.

Khiari A. 2002. Une région pionnière dans le Sahara algérien : El Ghrouss. In *Méditerranée. Le sahara, cette «autre Méditerranée»*, 99 (3-4), p. 27-30 (in French).

- Laib K, Hartani T, Bouarfa S, Kuper M, and Mailhol JC. 2018. Connecting Drip Irrigation Performance to Farmers' Practices: the Case of Greenhouse Horticulture in the Algerian Sahara. *Irrig. and Drain.*, 67: 392--403. <https://doi.org/10.1002/ird.2228>.
- Lamont JR. 2009. Overview of the use of high tunnels worldwide. *Hort Technology*. 19(1): 25-29.
- Le Grusse P , Mailhol J , Bouaziz A , Zairi A , Raki M , Chabaca M , Djebbara M and Ruelle P. 2009. Indicators and framework for analysing the technical and economic performance of irrigation systems at farm level. *Irrig. and Drain.*, 58: S307-S319. doi:[10.1002/ird.532](https://doi.org/10.1002/ird.532).
- Levine G. 1982. Relative water supply: An explanatory variable for irrigation systems. Technical Report :The Determinants of Irrigation Project Problems in Developing Countries. Cornell University. Ithaca, NY, USA. no.6;
- Luquet D, Vidal A, Smith M, Dauzat J. 2005. More crop per drop: how to make it acceptable for farmers. *Agricultural Water Management* 73: 108-119.
- Mailhol J C, Albasha R, Chevrion B, Lopez J M, Ruelle P, Dejean C. 2018. The PILOTE-N model for improving water and nitrogen management practices: Application in a Mediterranean context. *Agricultural Water Management* 204 : 162-179.
- Martin L. 2014. Les Serious Games, instruments de transformation des situations de travail. *Education Permanente* 198 : 219-228.
- McCown RL, Carberry PS, Hochman, Z, Dalgliesh NP, Foale MA, 2009. Re-inventing model-based decision support with Australian dryland farmers.1. Changing intervention concepts during 17 years of action research. *Crop and Pasture Science* 60:1017-1030. <http://dx.doi.org/10.1071/CP08455>.
- McDonald DR, Lau LS, Wu, I P, Gee HK, Young SCH. 1984. Improved emitter and network system design for reuse of wastewater in drip irrigation. Technical Report No 163. Water Resources Research Centre, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, USA.
- Merriam JL, Keller J. 1978. Farm irrigation evaluation: a guide for management. Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Nakayama FS, Bucks DA. 1981. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 24: 77-80.
- Naouri M., 2019. Du transfert à la traduction: Analyse des processus de l'innovation ouverte

des nouvelles technologies d'irrigation dans le sud algérien. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique ENSA El Harrach Alger. Algérie et l'IAV Hassan II de Rabat. Maroc.

Naouri M, Hartani T, Kuper M. 2017. The innovation factory: User-led incremental innovation of drip irrigation systems in Algerian Sahara. In: *Drip Irrigation for Agriculture: Untold stories of efficiency, innovation and development*. Routledge/Earth Scan Series, Chapter 16, p. 266-283.

Naouri M, Hartani T, Kuper M. 2015. Mobilités des jeunes ruraux pour intégrer les nouvelles agricultures sahariennes (Biskra- Algérie). *Cahiers Agricultures* 24(6) : 379-386 (in French).

Oron G, Shelef G, Turzynski B. 1979. Trickle irrigation using treated wastewaters. *Irrigation and Drainage Division*. 105 (2): 175-186.

Osty P, Landais E. 1993. Fonctionnement des systèmes d'exploitation pastorale In : Actes du IV^e congrès international des terres parcours (Montpellier, France, 22-26 avril 1991), tome 3, 1137-1146.

Papy F. 2004 a. Formuler les problèmes de mise en œuvre des techniques, comprendre les pratiques, penser l'innovation. In INRA (ed) *Agro-tribulations*. L'amié Pierre-louis Osty, 59-67.

Papy F. 2003. Comment l'agronome participe au processus d'innovation. In : des entretiens du Pradel 3rd (ed) , *Agronomes et innovation*. L'Hamattan, pp 9-20.

Poussin J C. 2008. Du diagnostic à l'action en agriculture. Activités, espaces et modèles. Géographie. Université de Reims - Champagne Ardenne .

Ravina, Paz E, Sofer Z, Marcu A, Shisha A, Sagi G. 1992. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed waste water. *IrrigationScience* 13: 129-139.

Ravina I, Paz E, Sofer Z, Marcu A, Shisha A, Sagi G, Yechialy Z, Lev Y. 1997. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent. *Agricultural Water Management* 33 (2-3): 127–137.

Sakthivadivel R, Fernando N, J Merrey D. 1992. Performance of new irrigation settlement schemes: A case study from Kirindi Oya, Sri Lanka. In: *Advancements in International Irrigation Management Institute's Research*. 205-233.

Senge P, 1990. *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*.

Doubleday Currency, New York.

Sieber S, Burke J, Faures J M, Frenken K, Hoogeveen J, Döll P, Portmann F T. 2010. Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1863-1880, 2010.

Steduto P, Raes D, Hsiao TC, Fereres E, Heng V, Izzi G, Hoogeveen J. 2009. Aquacrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes, series A*, 80: 285-292.

Steduto P, Hsiao TC, and Fereres E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrig. Sci.* 25: 189-207. Doi: 10.1007/s00271-007-0064-1.

Tanji KK, Keyes Cg. 2002. Water quality aspects of irrigation and drainage: past history and future challenges for civil engineers. *Irrigation and Drainage Engineering* 128(6):332-340.

Tisseyre B. Ducanhez A. 2013. Spatial variability of drip irrigation in small vine fields of south of France. 9th European Conference on Precision Agriculture, 07/07/2013 - 11/07/2013, Lleida, ESP. Wageningen Academic Publishers. Wageningen, The Netherlands.

Ulrich, Markus, 1997. Links Between Experiential Learning and Simulation & Gaming. Proceedings of the 28th Annual International Conference of the International Simulation and Gaming Association (ISAGA), July. p. 269-275.

Van der Kooij S, Kuper M, de Fraiture C, Lankford B, Zwarteveen M. 2017. [Re-allocating yet-to-be-saved water in irrigation modernization projects](#). In: *Drip Irrigation for Agriculture: Untold stories of efficiency, innovation and development*. Routledge/Earth Scan Series,

Van der Kooij S, Zwarteveen M, Boesveld H, Kuper M. 2013. The efficiency of drip irrigation unpacked. *Agricultural Water Management*, 123: 103-110.

Wang J, Gong S, Xu D, Yu Y, Zhao Y (2013) Impact of drip and level basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain. *Irrig Sci.* 1-13.

Yuan BZ, Kang Y, Nishiyama S. 2001. Drip irrigation scheduling for tomatoes in unheated greenhouse. *Irrigation Science*, 20 (3) : 149-154.

Annexes

Annexe 2 : Calcul des incertitudes relatives à la méthode d'estimation des apports d'eau et d'azote.

A partir du calendrier simplifié d'irrigation et de fertilisation (annexe1) nous avons calculé les doses d'irrigation et de fertilisation apportées par chaque agriculteur, nous montrons dans cette partie niveau d'incertitude par rapport aux grandeurs physiques calculées.

a. Irrigation

1^{er} niveau d'incertitude : Estimation quantitative des apports d'eau par irrigation :

- Incertitude provenant de la mesure des 16 débits des goutteurs : incertitude sur la lecture des volumes, incertitude sur le temps de mesure. « Estimé en valeur absolue à 1 mm ».
- Incertitude provenant de la méthode de mesure et le choix des 16 goutteurs.
- Incertitude provenant de la considération du débit moyen des 16 goutteurs comme débit moyen de base de calcul de la dose d'irrigation.

2^{ème} niveau d'incertitude : Estimation des calendriers d'irrigation :

- Incertitude provenant de la durée totale d'une irrigation, les durée sont tout le temps arrondies, est-il réellement le cas ? « Estimer en valeur absolue à 5 min ».
- Incertitude qui provient du nombre des irrigations (fréquence), risque d'ajouter ou d'omettre une irrigation. « estimer en valeur absolue à une irrigation moyenne ».

b. Fertilisation

La déduction des calendriers de fertilisation s'est faite sur la base des déclarations des agriculteurs mêmes. Les apports ponctuels sont dressés en quantité et en type d'engrais (composition en N.P.K). Ceci était combiné au calendrier d'irrigation, l'exemple en annexe montre les détails de calcul.

L'estimation des incertitudes relatives à la mesure de ce paramètre se fait comme suit

1^{er} niveau d'incertitude : Estimation quantitative des apports de N

- Incertitude provenant de l'estimation de la quantité d'engrais apporté par irrigation, généralement et lors des entretiens, cette quantité est arrondie (1 Kg, 2 Kg,...) sauf que est ce que les agriculteurs y apportent des quantités arrondies ? « Estimé en valeur absolue à 10% ».
- Incertitude en lien avec le degré de solubilité de l'engrais à son usage, en tenant en compte le système de dilution bricolé et utilisé à cet effet. « estimer en valeur négative à 10% »
- Incertitude relative à l'homogénéité de distribution de l'engrais en lien avec le CU du système goutte à goutte utilisé. « A ne pas considérer ».
- Incertitude provenant de la portion de l'azote réellement contenu dans l'engrais en lien avec la composition déclarée par le fabricant (à négliger). « A ne pas considérer ».

2^{ème} niveau d'incertitude : Estimation des apports totaux de N

- Incertitude qui provient du nombre d'applications d'engrais, risque d'ajouter ou d'omettre une fertilisation (déclaration des agriculteurs). « estimer en valeur absolue à une fertilisation moyenne ».

Les calculs :

Afin d'estimer la grandeur des incertitudes pour les deux paramètres mesurés, nous avons pris un cas au hasard des 13 agriculteurs étudiés. L'intégration des incertitudes a donné ce qui suit :

a. Irrigation :

a.1. Incertitude sur la lecture des volumes des goutteurs lors des mesures de débit :

$$V = V_0 \pm \Delta V \text{ (ml) ;}$$

L'incertitude relative $\Delta V/V$ est estimé à en valeur absolue à 1%.

$$Q = \frac{V}{t} * 3.6 \text{ (l/h)}$$

où :

V : Volume d'eau mesuré en (ml),

t : temps de mesure en seconde.

3.6 : Paramètre de conversion vers l'unité l/h.

Appliquant la fonction logarithmique sur les deux membres de l'équation :

$$\log Q = \log \left[\frac{V}{t} * 3.6 \right]$$

D'après les propriétés de la fonction logarithmique, on peut écrire :

$$\log Q = \log V - \log T + \log 3.6$$

Ecrivons à présent la différentielle logarithmique et développons ensuite :

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dV}{V} - \frac{dT}{T} + \frac{d3,6}{3,6}$$

Le paramètre 3.6 est une constante, sa dérivée égale à 0.

Nous arrivons à l'expression de l'incertitude relative suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta T}{T}$$

Considérant qu'il n'y a pas d'incertitude sur le paramètre T, cela implique que :

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{\Delta V}{V} = \pm 1\%$$

Sur le débit moyen et partant de l'équation :

$$Q_m = \frac{\sum Q_i}{N} \text{ (l/h)}$$

où :

Q_m : Moyenne arithmétique des débits mesurés.

Q : débits calculés à partir des volumes mesurés,

N : nombre total de points de mesure (N=16).

La valeur totale de l'incertitude à considérer est de l'ordre de 1% en valeur absolue sur la valeur du débit moyen calculé.

$$Q_{mi} = Q_m \pm 1\% (l/h)$$

Q_{mi} : Débit moyen après considération des incertitudes.

Le calcul des doses d'irrigation

$$D = \frac{(Q_m * T * L * n * 10)}{1000 * 0,4} (mm)$$

où :

D : dose d'irrigation (mm),

Q_m : débit moyen calculé (en l/h),

T : Temps d'une irrigation (h),

L : Longueur des rampes de goutte à goutte (50 m pour notre cas),

n : Nombre de rampes de goutte à goutte (9 pour notre cas),

1000 : paramètre de conversion de volume (du litre au m³).

0,4 : paramètre de conversion de surface (de la serre de 400 m² à l'hectare).

Par considération qu'il y a une incertitude sur le paramètre T (temps d'irrigation), dont la valeur est estimée à 2 min/heure d'irrigation, c'est l'équivalent de $\pm 3,3\%$

Par considération que la valeur de l'incertitude relative sur le débit Q_m est de $\pm 1\%$,

En considérant le reste des paramètres de l'équation (...) comme étant constants et sans incertitudes,

Et par application de la règle de mathématique relative aux calculs de l'incertitude relative, cas de grandeurs physiques indépendantes :

$$D = \frac{(Q_m * T * L * n * 10)}{1000 * 0,4}$$

Si on considère que

$$x = \frac{L * n * 10}{1000 * 0,4}$$

L'équation de D s'écrit donc comme suit :

$$D = Q_m * T * x (mm)$$

Appliquant la fonction logarithmique sur les deux membres de l'équation :

$$\log D = \log [Q_m * T * x]$$

D'après les propriétés de la fonction logarithmique, on peut écrire :

$$\log D = \log Q_m + \log T + \log x$$

Ecrivons à présent la différentielle logarithmique et développons ensuite :

$$\frac{dD}{D} = \frac{dQ_m}{Q_m} + \frac{dT}{T} + \frac{dx}{x}$$

Le paramètre x est constant, sa dérivée égale à 0.

Nous arrivons à l'expression de l'incertitude relative suivante :

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta Qm}{Qm} + \frac{\Delta T}{T}$$

La dose totale apportée :

$$\frac{\Delta D}{D} = 1\% + 3,3\%$$

a.2. Incertitude sur la constitution du calendrier des irrigations :

On suppose que lors de la constitution des calendriers d'irrigation, on a omis de citer une irrigation dont la durée égale à la durée maximale des irrigations. Sa représentation ne dépasse pas 3%.

L'incertitude relative de la dose totale d'irrigation est estimée à :

$$Di = D \pm 7,3\% (mm)$$

Exemple d'un agriculteur :

La dose totale apporté = 577 mm,

La valeur de l'incertitude ΔD égale : ± 42 mm.

b. La fertilisation :

b.1. Incertitude sur la quantité d'apport d'engrais à chaque fertilisation :

Soit un engrais x de la composition suivante : $\alpha N \beta P \gamma K$

La quantité d'apport de N est estimée comme suit :

$$q = \frac{\alpha}{100} * x$$

Où ;

q : L'apport partiel d'azote à chaque fertilisation.

α : représente la portion de l'azote dans l'engrais,

x : est la quantité apportée de l'engrais considéré en (Kg).

Considérant une incertitude sur la quantité apporté x en Kg estimée à

$$\Delta x = \pm 10\%$$

On suppose que le paramètre $\frac{\alpha}{100}$ est une constante, l'incertitude sur l'apport d'engrais sera :

$$\Delta q = \pm 10\%$$

b.2. Incertitude provenant du degré de solubilité l'engrais à cause du dispositif de fertilisation utilisé (bidon de fertilisation) : cette incertitude est estimée à 90% de la quantité totale apporté de l'engrais.

Pour cela ; la quantité apporté q sera multiplié par un coefficient de réduction égale à 0,9.

Si on prend l'exemple du même agriculteur,

Apport total de N= 194 Kg/Ha,

$\Delta q = \pm 19,4$ Kg.

Annexe 3 : Fichier sortie du modèle PILOTE N « Résultat.txt »

Modele PILOTE-N: Resultats de la Simulation

Site: Biskra serre

Reserve maxi: 192. mm Reserve mini : 60. mm

Profondeur racinaire maxi Px: 0.60 m

Taux Max d'acrossement racinaire : 0.007 m/j

Date de Semis le : 248 ieme jour

Date de D,but de simulation : 230 ieme jour

Date de fin de simulation : 365 ieme jour

Valeur Initiale de la Reserve : 160. mm sur Px

Resultats de l'annee 2015

Resultats de l'annee 2016

Stock sur Px au Semis: 192. mm

Irrigations : dates(jc) et Doses en mm

240	27.0
243	6.8
244	27.0
247	6.8
248	27.0
251	6.8
252	27.0
255	6.8
256	27.0
259	6.8
260	27.0
263	6.8
264	27.0
267	6.8
268	27.0
271	6.8
272	27.0
275	6.8
276	27.0
279	6.8
280	27.0
283	6.8
284	27.0
287	6.8
288	27.0
291	6.8
292	27.0
295	6.8
296	27.0
299	6.8
289	47.2
296	13.5
298	47.2
305	13.5

314	13.5
316	47.2
341	13.5
343	47.2
350	13.5
351	47.2
366	20.2
4	47.2
19	20.2
22	47.2
37	20.2
40	47.2
55	20.2
58	47.2
73	20.2

Dose Totale Apportee: 1269. mm

Sur le Cycle Cultural:

Etr(Plante+Sol)

Etr : 461. mm

Etm : 461. mm

Evaporation du Sol : 169. mm

Drainage : 302. mm

Hauteur de Pluie : 0. mm

Stock/Px fin de cycle : 139. mm

StNini : 60. kg/ha

ApporN : 124. kg/ha: eff= 100. %

Nplante: 183. kg/ka

Nminera: 89. kg/ha

Nlixivi: 19. kg/ha

StNsolf: 56. kg/ha

Denitri: 28. kg/ha

R,sidu culture: 0.0 T/ha enfoui le jour 46

Caracteristiques du Rendement:

Tmat(variete): 3200.°c base 6.,soit a:188 JAS

L.A.I Moyen: 1.8 entre 67 et 159 JAS

Matiere Seche Totale: 15.2 T/ha

Rendement(hu: 87.%) : 86.3 T/ha

Rendement(hu:0 %) : 11.2 T/ha

Sur la Duree de Simulation:

Pluie Totale : 0. mm

Evaporation sol : 264. mm

Drainage : 302. mm

Nlessive : 19. kg/ha

Mineralization : 155. kg/ha

Denitrification : 28. kg/ha

Stock Final N R1 : 81. kg/ha

Stock Final N R2 : 28. kg/ha

Annexe 4 : Cycle de l'azote dans le sol

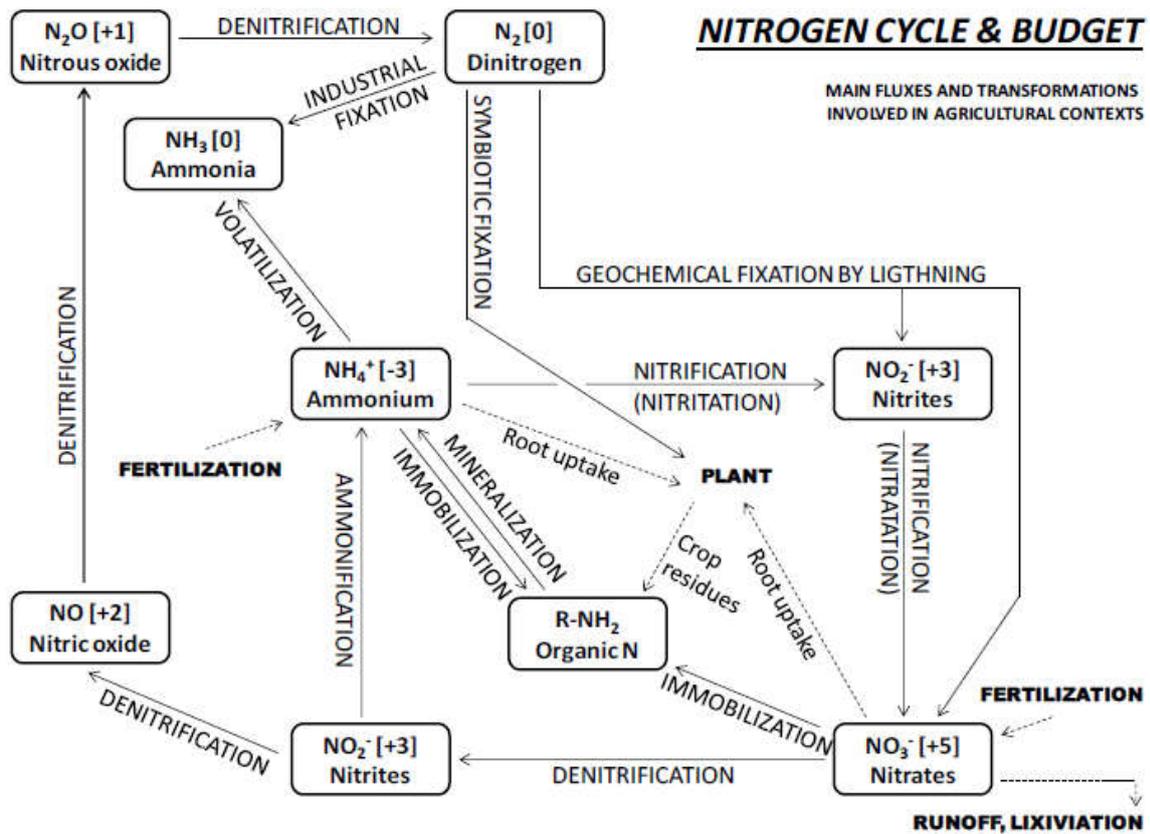


Figure 34 : Schéma démonstratif du cycle et forme de l'azote montrant les principales formes et transformation de l'azote dans un contexte agricole

Source : Barakat et al., 2016

Résumé

Tenir compte des conditions réelles de terrain pour évaluer la performance d'un équipement d'irrigation constitue un défi majeur pour les scientifiques. La difficulté de l'approche consiste dans la constitution des indicateurs mesurables reflétant la réelle performance de ces équipements. Avoir une bonne appréciation du niveau de performance d'un système d'irrigation constitue un premier pas dans son amélioration. De nombreuses méthodes de vulgarisation sont ainsi mobilisées, elles visent le transfert de l'expertise scientifique d'irrigation, produite en laboratoire, aux agriculteurs sur leur terrain. Ces méthodes de vulgarisation qui suivent un modèle linéaire, descendant trouvent leur limite. Ceci a laissé la place à une expertise d'usage construite localement sur le terrain à la suite aux interactions entre les acteurs locaux de terrain, conduisant ainsi à une diversité de pratiques agricoles, y compris d'irrigation et de fertilisation, entre les agriculteurs de profils différents. Cette diversité se traduit par des rendements variables (pour la tomate) de 55 à 110 Tonne par hectare. Cette thèse vient de mettre d'une part en question les approches conventionnelles d'évaluation de la performance d'irrigation et d'autre part le débat sur la méthode d'apprentissage adoptées pour la vulgarisation en agriculture.

Cette étude est menée sur un équipement d'irrigation localisé en gaines perforées de goutte à goutte, qualifié de « low-cost ». Cet équipement devient la technique principale pour l'apport d'eau et d'engrais aux cultures maraichères cultivées sous serre dans la région des Ziban dans le Sud-est de l'Algérie. Grâce à la disponibilité de la terre, de l'eau et d'un climat favorable à la production précoce des maraichers, cette région a connu un boom agricole au cours des vingt dernières années. Ce boom était soutenu par un arrivage massif de jeunes agriculteurs, venant principalement du Nord, qui viennent à la recherche d'un avenir à partir des serres.

Ce travail a pour objectif d'analyser la performance de fertigation en goutte à goutte dans les conditions réelles des agriculteurs. Ceci en se basant sur une approche méthodologique innovante permettant la combinaison de l'expertise technique et d'usage. L'approche s'articule sur trois principaux axes : i) une co-analyse des pratiques avec les agriculteurs, ii) une analyse des effets des pratiques par la modélisation sur le plan hydraulique et agronomique et iii) une mise en œuvre d'une démarche participative pour débattre et améliorer les pratiques de fertigation.

Ce choix méthodologique nous a permis de comprendre l'influence des facteurs externes sur la décision d'irrigation et de fertilisation des agriculteurs. A travers la modélisation, nous avons pu expliquer les effets de ces pratiques sur les cultures et en particulier sur les rendements. Ce retour instantané des effets des pratiques sur le rendement donné par les modèles utilisés, à savoir Aquacrop et Pilote N, a constitué un outil pédagogique efficace, sa mobilisation a conduit trois quart des participants aux ateliers d'apprentissage à améliorer leurs pratiques de fertigation.

Mots clé : Performance, goutte à goutte, expertise technique, expertise d'usage, modélisation, démarche participative, fertigation, Biskra, Algérie.

Abstract

The consideration of actual field conditions while assessing the performance of an irrigation equipment constitute a major challenge for scientists. The difficulty of this approach consists in the constitution of the measurable indicators reflecting the real performance of these equipments. Having a good appreciation performance level of an irrigation system is a first step in its improvement. Many extension methods are thus mobilized. They aim at the transfer of the scientific expertise of irrigation, experienced in laboratory, to farmers at the field level. These extension methods that follow a linear, descending model find their limit. At the other hand, a local experience called “expertise of usage” locally-built as a result several interactions between local field actors, leading to a variety of agricultural practices, including irrigation and fertilization, among farmers at the field level. This diversity results in variable yields (for tomatoes) of 55 to 110 tons per hectare. This thesis comes treats the conventional approaches to assessing irrigation performance and the debate on the method of learning adopted for agricultural extension.

This study is conducted on localized irrigation equipment, described as "low-cost". This equipment becomes the main technique used to supply water and fertilizer to greenhouse horticulture crops Ziban, south-eastern Algeria. The abundance of land, water and a climate favorable to the early production of vegetables, this area has experienced an agricultural boom during the last two decades. This boom was supported by a massive arrival of young farmers, mainly from the North of Algeria, they were looking for a good and profitable job in greenhouses.

This research aims to analyze the performance of fertigation using dripper lines at the field level. An innovative methodological approach is to mobilize. This is based on the combination of technical expertise and local expertise of usage. The approach is axes on: i) a co-analysis of practices with farmers, ii) an analysis of the effects of practices through hydraulic and agronomic modeling and iii) an implementation of a participatory approach to debate and improve farmers' practices.

This methodological approach allowed us to understand the influence of external factors on farmers' irrigation and fertilization decisions. Through modeling, we have been able to explain the effects of these practices on crops and in particular on yields. This instant feedback of the effects of the practices on the yield given by Aquacrop

and Pilote N models was an effective educational tool, its mobilization led three quarters of the participants in the apprenticeship workshops to improve their fertigation practices.

Keywords: Performance, drip irrigation, technical expertise, usage expertise, modeling, participatory approach, fertigation, Biskra, Algeria.

المخلص

يعتبر الأخذ في الاعتبار الظروف الميدانية الفعلية لتقييم نجاعة معدات السقي تحديا كبيرا للباحثين في هذا المجال. تتمثل صعوبة النهج في طبيعة المؤشرات المقترحة و كذا قابلية قياسها في الميدان مع لأقل هامش خطأ. مما يعكس الأداء الحقيقي لهذه المعدات. إن التقدير الجيد لمستوى أداء نظم السقي يعد أول خطوة في عملية تحسين أدائه. لهدف نقل الخبرة العلمية لمختلف الممارسات الفلاحية المنتجة في المختبر عموما، و المتعلقة بالسقي خصوصا، إلى المزارعين على أرض الميدان يتم الاستعانة بعدد الطرق الإرشادية. المعروف عنها حتى الآن أنها تنتهج نموذجا خطيا، ما مكنها من عدم تحقيق أهدافها المنتظرة. هذا ما أفسح المجال أمام الخبرة الميدانية المحلية التي هي نتيجة لتبادل مستمر للخبرات بين الجهات الفاعلة محليا في الميدان. هذا ما نتج عنه تباين في الممارسات الزراعية بين المزارعين، بما في ذلك ممارسات السقي والتسميد، بين المزارعين. ترجم هذا الاختلاف نتائج متباينة في محصول الطماطم على سبيل المثال تتراوح من 55 إلى 110 طن لكل هكتار. لقد وضعت هذه الأطروحة تساؤلات حول الطرق التقليدية المتبعة لتقييم نجاعة السقي و التسميد و إمكانية الاستعانة بمؤشرات تقاس ميدانيا، إضافة إلى مناقشة السبل المتبعة في الإرشاد الزراعي.

أجريت هذه الدراسة على معدات السقي بالتقطير ، الموصوفة بأنها "منخفضة التكلفة. إذ أصبحت هذه الطريقة الوسيلة الوحيدة للتزويد بالماء و الأسمدة لمحاصيل الخضروات داخل البيوت المحمية في منطقة الزيبان في الجنوب الشرقي للجزائر. بفضل وفرة الأراضي و المياه، و بفضل المناخ الملائم للإنتاج المبكر للخضروات، شهدت هذه المنطقة انطلاقا نوعية زراعية خلال العشرين عامًا الماضية. كان هذا التميز مدعوماً بإقبال فريد من نوعه لمزارعين شباب قدموا وخاصة من الشمال الجزائري. هدفهم البحث عن مستقبل أفضل من خلال ممارسة الزراعة في البيوت المحمية.

يهدف هذا العمل إلى تقييم أداء السقي و التسميد بطريقة التنقيط مع الأخذ بعين الاعتبار الظروف الحقيقية المحيطة بالمزارعين. ويستند ذلك إلى انتهاج طريقة مبتكرة تسمح بدمج الخبرة التقنية الميدانية. تتمحور المقاربة حول ثلاثة محاور رئيسية: (1) تحليل مشترك للممارسات مع المزارعين ، (2) تحليل لآثار الممارسات من خلال استعمال النظم المعلوماتية ، (3) تنفيذ النهج التشاركي في النقاش وتحسين ممارسات السقي و التسميد.

سمح لنا هذا الاختيار المنهجي بفهم تأثير العوامل الخارجية على قرارات السقي والتسميد لدى المزارعين. من خلال استعمال النظم المعلوماتية ، تمكنا من شرح آثار هذه الممارسات على المحاصيل. كان هذه الرجوع الآني لآثار الممارسات على المحصول الذي قدمته النماذج المستخدمة ، وهي Aquacrop و Pilot N ، أداة تعليمية فعالة ، وقد مكن استعمالها الى اقناع ثلاثة أرباع المشاركين في ورش التدريب المهني لتحسين ممارسات السقي و التسميد لديهم.

الكلمات المفتاحية: النجاعة ، السقي بالتقطير ، الخبرة التقنية ، خبرة الاستخدام ، النمذجة ، النهج التشاركي ، السقي و لتسميد ، بسكرة ، الجزائر.