Evaluation de l'efficience et de la performance des périmètres irrigués en transition

Une méthodologie intégrée appliquée au cas de la plaine des Triffa au Maroc

Nicolas Feltz

Septembre 2016

Thèse présentée en vue de l'obtention
du grade de docteur en sciences agronomiques
et ingénierie biologique

Composition du jury :

Promoteur	M. Vanclooster (UCL)
Président	B. Delvaux (UCL)
Lecteurs	F. Gaspart (UCL)
	M. Javaux (UCL)
	D. Raes (KUL)
	M. Sbaa (UMP)
	N. Van Cauwenbergh (UNESCO-IHE)

UCL Université catholique de Louvain
AGRO LOUVAIN

Quel savoureux moment que celui d'imprimer sa thèse ! L'aboutissement de près de six années de travail, la fin d'une époque.
Une thèse est avant tout une aventure personnelle. C'est aussi une aventure faite de rencontres, de collaborations, d'échanges, de discussions, d'entraide. Bref, une aventure collective. Je souhaite, dans ces quelques lignes, remercier les personnes qui, directement ou indirectement, ont participé à cette aventure et l'ont rendue possible.
Marnik, mon promoteur, m'a, tout au long de ces années, suivi et soutenu en faisant preuve d'une grande confiance et d'une formidable ouverture d'esprit. Il a su être présent et à l'écoute quand ce fut nécessaire. Je tiens donc à le remercier tout particulièrement.
Je remercie également les professeurs F. Gaspart, M. Javaux et D. Raes, membres de mon comité d'accompagnement. Ils ont accepté de me suivre tout au long de ces années et, sans leurs précieux conseils et leurs critiques, cette thèse ne serait pas ce qu'elle est. Le professeur M. Sbaa m'a fait découvrir et apprécier le Maroc et a rendu possible mes multiples séjours dans ce pays. Je le remercie pour cette contribution qui fut déterminante dans le succès de mon travail. Je voudrais enfin remercier la professeur N. van Cauwenbergh pour son temps, ses commentaires, ses critiques et ses suggestions qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce document.
Je voudrais ensuite remercier l'ensemble des collègues du projet PIC, en particulier Karim et Karima, qui, au Maroc ou en Belgique, m'accompagnèrent durant la plus grande partie de ce travail. Je voulais aussi remercier les innombrables personnes, membres de l'ORMVAM, de l'ABHM, de l'UMP, de l'IAV, de l'UCL, de Gembloux-ABT ou agriculteurs - et j'en oublie certainement - qui, par leur témoignage ou leur aide ponctuelle, apportèrent leur pierre à cette thèse.
La proximité des collègues du « Geru », de l'UCL, des assistants, s'est avérée tout aussi indispensable qu'agréable. Difficile de citer tout le monde. Difficile aussi de ne pas réserver une mention spéciale à mon voisin de bureau, collègue assistant et ami, Jean-Baptiste, pour tout. Merci à lui, merci à vous !
L'équipe de relecteurs qui a eu le courage et la générosité de relire l'intégralité de ce document mérite une attention particulière. Merci maman, Oli, papa, Manu, Julien, Emi, JB !
J'ai gardé la meilleure pour la fin. Merci à Emilie pour son soutien au quotidien, merci d'avoir enduré ça, merci d'être là !

Life is like a box of chocolates. You never know what you're gonna get.

Forest Gump

Table des matières

LISTE DES FIGURES ..... - 1 -

LISTE DES TABLEAUX ..... - 5 -

INTRODUCTION ..... - 7 -

CHAPITRE 1 – CONTEXTE ET OBJECTIFS ..... - 11 -

1.1 - CONTEXTE ..... - 11 -
IRRIGATION : GÉNÉRALITÉS ..... - 11 -
POLITIQUES DE DÉVELOPPEMENT DES GRANDS PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS ..... - 16 -
EVALUATION DES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION ..... - 19 -
1.2 – ETAT DE L'ART ..... - 23 -
EFFICIENCE DE L'IRRIGATION ..... - 23 -
SUCCÈS DE LA TECHNOLOGIE GOUTTE-À-GOUTTE ..... - 26 -
ADOPTION DE LA TECHNOLOGIE GOUTTE-À-GOUTTE ..... - 29 -
1.3 - HYPOTHÈSES, OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE ..... - 35 -
OBJECTIFS ..... - 35 -
HYPOTHÈSES ..... - 37 -
REMARQUE SÉMANTIQUE ..... - 40 -
MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE ET LIMITES DU TRAVAIL ..... - 41 -

CHAPITRE 2 - ZONE D'ÉTUDE ..... - 45 -

2.1 - PRÉSENTATION GÉNÉRALE ..... - 47 -
2.2 - GESTION DE L'IRRIGATION ..... - 53 -
PRÉLÈVEMENT D'EAU ..... - 53 -
DISTRIBUTION D'EAU ..... - 56 -
GESTION À LA PARCELLE ..... - 58 -
IRRIGATION GRAVITAIRE ..... - 59 -
IRRIGATION GOUTTE-À-GOUTTE ..... - 61 -
SOUTIEN À L'IRRIGATION GOUTTE-À-GOUTTE ..... - 62 -
BESOINS EN EAU ..... - 63 -

2.3 – ACQUISITION DES DONNÉES ..... - 67 -
DONNÉES DISPONIBLES POUR L'ENSEMBLE DE LA ZONE D'ÉTUDE ..... - 67 -
MÉTÉOROLOGIE ..... - 67 -
PÉDOLOGIE ..... - 70 -
PIÉZOMÉTRIE ..... - 72 -
DONNÉES AGRONOMIQUES ..... - 75 -
DÉBIT DANS LES CANAUX D'IRRIGATION ..... - 77 -
DONNÉES COLLECTÉES POUR UN ÉCHANTILLON D'AGRICULTEURS ..... - 78 -
PRÉSENTATION DE L'ÉCHANTILLON ..... - 79 -
PRÉSENTATION DES DONNÉES COLLECTÉES ..... - 82 -
CONCLUSION ..... - 85 -

CHAPITRE 3 - NOTIONS D'EFFICIENCE ..... - 87 -

3.1 - DE L'IMPORTANCE D'INTÉGRER L'USAGE DANS LE CALCUL DE L'EFFICIENCE DE L'IRRIGATION À L'ÉCHELLE PARCELLAIRE : LA NOTION D'*EFFET D'USAGE* ..... - 89 -
INTRODUCTION ..... - 89 -
MÉTHODOLOGIE ..... - 91 -
FORMULATION MATHÉMATIQUE ..... - 91 -
COLLECTE DES DONNÉES ..... - 92 -
CALCUL DE L'EFFICIENCE DE L'IRRIGATION ..... - 93 -
RÉSULTATS ..... - 95 -
EFFICIENCE DE L'IRRIGATION *H* ..... - 95 -
EFFET D'USAGE E_U ..... - 97 -
ETUDE DE LA VARIABILITÉ ..... - 98 -
DISCUSSION ..... - 104 -
EFFICIENCE DE L'IRRIGATION *H* ET EFFET D'USAGE E_U ..... - 104 -
EFFET D'USAGE ET GESTION DE L'AGRICULTEUR ..... - 107 -
CONCLUSION ..... - 108 -
3.2 - EFFICIENCE DE L'IRRIGATION À L'ÉCHELLE PARCELLAIRE : FONCTIONS D'USAGE ET TECHNIQUE D'IRRIGATION ..... - 111 -
INTRODUCTION ..... - 111 -
MÉTHODOLOGIE ..... - 114 -
FORMULATION MATHÉMATIQUE ..... - 114 -
COLLECTE DES DONNÉES ..... - 115 -
TRAITEMENT DES DONNÉES ..... - 115 -

Résultats ..... - 117 -
Sélection des variables pour l'approche *ESR* ..... - 117 -
Présentation des données ..... - 119 -
Implémentation de l'approche *ESR* ..... - 122 -
Discussion ..... - 125 -
Conclusion ..... - 128 -
3.3 - Efficience de l'irrigation à l'échelle du périmètre dans un contexte de transition à l'irrigation goutte-à-goutte : pressions sur les ressources en eau ..... - 131 -
Introduction ..... - 131 -
Méthodologie ..... - 133 -
Fonctionnement hydrologique de la zone d'étude ..... - 133 -
Présentation du modèle ..... - 135 -
Calibration du modèle ..... - 147 -
Présentation des résultats ..... - 148 -
Analyse des résultats ..... - 156 -
Apports d'eau depuis le barrage ..... - 156 -
Pressions sur la nappe d'eau souterraine ..... - 158 -
Discussion ..... - 162 -
Le modèle ..... - 162 -
La nappe d'eau souterraine ..... - 164 -
Les apports d'eau du barrage ..... - 165 -
Conclusion ..... - 166 -

CHAPITRE 4 - NOTIONS DE PERFORMANCE ..... - 169 -

4.1 - Objectifs et stratégie d'évaluation des performances ..... - 171 -
4.2 - Conception du processus d'évaluation des performances de l'irrigation ..... - 177 -
Méthodologie ..... - 178 -
Impact du changement de technique d'irrigation ..... - 179 -
Adaptation au contexte de la zone étudiée ..... - 180 -
Perspective de l'agriculteur ..... - 180 -
Restriction au cadre fixé pour ce travail ..... - 181 -
Prise en compte des données disponibles ..... - 181 -
Ajout de nouveaux indicateurs ..... - 182 -

Résultats ..... - 183 -
Les principes ..... - 183 -
Les critères ..... - 184 -
Les indicateurs ..... - 185 -
Discussion ..... - 187 -
Conclusion ..... - 196 -
4.3 - Evaluation des performances de l'irrigation dans un contexte de transition à l'irrigation goutte-à-goutte ..... - 199 -
Méthodologie ..... - 199 -
Calcul des indicateurs ..... - 199 -
Analyse de la performance ..... - 203 -
Présentation des résultats ..... - 204 -
Analyse des résultats ..... - 209 -
L'aspect environnemental ..... - 211 -
L'aspect économique ..... - 214 -
L'aspect social ..... - 214 -
Discussion ..... - 217 -
Conclusion ..... - 220 -

CHAPITRE 5 – DE LA QUESTION DES DONNÉES ..... - 223 -

5.1 - Etendue du problème ..... - 225 -
Existence des données ..... - 225 -
Accès aux données ..... - 226 -
Qualité des données ..... - 228 -
5.2 - Solutions mises en place ..... - 231 -
Existence des données ..... - 231 -
Accès aux données ..... - 232 -
Qualité des données ..... - 234 -
Calcul de l'efficience de l'irrigation h ..... - 234 -
Calcul des pressions sur les ressources en eau ..... - 237 -
Etude des performances de l'irrigation ..... - 242 -

CONCLUSION ..... - 245 -

BIBLIOGRAPHIE ..... - 251 -

ANNEXES.....- 267 -

Liste des figures

Figure 1 : Vision schématique de la thèse et des hypothèses sous-jacentes.....- 39 -
Figure 2 : Présentation générale de la zone d'étude. .....- 48 -
Figure 3 : Coupe géologique schématique. .....- 49 -
Figure 4 : Pédologie de la zone d'étude. .....- 50 -
Figure 5 : Précipitations et évapotranspiration potentielle. .....- 51 -
Figure 6 : Irrigation gravitaire. .....- 60 -
Figure 7 : Températures quotidiennes. .....- 68 -
Figure 8 : Précipitations mensuelles. .....- 70 -
Figure 9 : Pédologie de la zone d'étude.et emplacements des profils utilisés.. ....- 71 -
Figure 10 : Disposition des piézomètres utilisés. .....- 73 -
Figure 11 : Evolution des niveaux piézométriques au sein de la zone d'étude. ....- 74 -
Figure 12 : Evolution des niveaux piézométriques amont et aval.....- 75 -
Figure 13 : Evolution du nombre d'agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte. .....- 77 -
Figure 14 : Evolution des superficies cultivées [ha] irriguée par irrigation goutte-à-goutte. .....- 77 -
Figure 15 : Débits mensuels alimentant le CMV103. .....- 78 -
Figure 16 : Localisation des 25 exploitations analysées. .....- 80 -
Figure 17 : Irrigation hebdomadaire [mm] des parcelles des agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire et goutte-à-goutte. .....- 83 -
Figure 18 : Histogrammes de l'efficience de l'irrigation η mesurée pour l'irrigation gravitaire et goutte-à-goutte. .....- 96 -
Figure 19 : Relation entre l'efficience de l'irrigation η et l'évapotranspiration relative. .....- 97 -
Figure 20 : Histogrammes de l'effet d'usage e_u pour l'irrigation gravitaire et goutte-à-goutte. .....- 98 -
Figure 21 : Variabilité de l'efficience de l'irrigation η au sein des 3 groupes identifiés comme les plus pertinents. .....- 101 -
Figure 22 : Variabilité de l'effet d'usage e_u au sein des 3 groupes identifiés comme les plus pertinents. .....- 101 -
Figure 23 : Relation entre la taille de l'exploitation et l'effet d'usage η_u pour les parcelles irriguées au goutte-à-goutte. .....- 102 -
Figure 24 : Relation entre l'effet d'usage e_u et la taille de l'exploitation pour les parcelles d'agrumes irriguées par voie gravitaire. .....- 103 -
Figure 25 : Relation entre l'effet d'usage e_u et le rapport entre la superficie plantée avec des agrumes et la taille officielle de l'exploitation. .....- 103 -

Figure 26 : Schéma du fonctionnement hydrologique de la zone d'étude......- 134 -
Figure 27 : Disposition des piézomètres utilisés. .....- 145 -
Figure 28 : Relation entre les niveaux des piézomètres (1)......- 145 -
Figure 29 : Relation entre les niveaux des piézomètres (2)......- 146 -
Figure 30 : Evolutions du niveau de la nappe d'eau souterraine (paramètres par défaut). .....- 149 -
Figure 31 : Résultats de l'analyse de sensibilité sur le niveau de la nappe. .....- 150 -
Figure 32 : Résultats de l'analyse de sensibilité sur le débit. .....- 151 -
Figure 33 : Niveaux de nappe mesurés et modélisés avec les paramètres obtenus par optimisation du niveau de la nappe et par optimisation du niveau de nappe et du débit dans le canal d'irrigation et débits dans le canal mesurés et modélisés avec les paramètres obtenus par optimisation du niveau de la nappe et par optimisation du niveau de nappe et du débit dans le canal d'irrigation......- 153 -
Figure 34 : Niveaux de nappe mesurés et modélisés pour un modèle modifié dans lequel le débit mesuré dans le canal d'amenée d'eau d'irrigation est une donnée d'entrée. .....- 154 -
Figure 35 : Niveaux de nappe mesurés et modélisés pour le modèle faisant intervenir un facteur p variable. .....- 155 -
Figure 36 : Evolution des niveaux de la nappe mesurés, modélisés avec le facteur p fixe et modélisés avec le facteur p variable. .....- 155 -
Figure 37 : Evolution du débit dans le canal mesuré, modélisés avec le facteur p fixe et modélisés avec le facteur p variable......- 156 -
Figure 38 : Evolution conjointe de la proportion de superficie irriguée au goutte-à-goutte et de l'apport annuel d'eau d'irrigation depuis le barrage et apports annuels d'eau d'irrigation depuis le barrage en fonction de la proportion de superficie irriguée au goutte-à-goutte......- 157 -
Figure 39 : Evolution des niveaux de la nappe mesurés, modélisés et évolution théorique du niveau de la nappe si les apports d'eau par infiltration de la pluie et par drainage latéral étaient uniformément répartis sur la période de modélisation pour le modèle avec un facteur p fixe.......- 158 -
Figure 40 : Effet de la pluviométrie sur la variation du niveau de la nappe. .....- 159 -
Figure 41 : Evolution théorique du niveau de la nappe si les apports d'eau par infiltration de la pluie et par drainage latéral étaient uniformément répartis sur la période de modélisation et évolution de la proportion de superficie irriguée en goutte-à-goutte. .....- 160 -
Figure 42 : Relation entre la quantité d'eau d'irrigation appliquée et l'efficience de l'irrigation η. .....- 237 -
Figure 43 : Distribution des valeurs de pourcentage d'eau d'irrigation pompé obtenues par optimisation pour les 256 scénarios testés pour mesurer l'impact de la qualité des données d'entrée......- 239 -

Figure 44 : Evolution du niveau de la nappe mesurée et modélisée pour les 256 scénarios testés pour mesurer l'impact de la qualité des données d'entrée et pour la situation de référence. ..... *- 241 -*
Figure 45 : Distribution des valeurs de la fonction objectif obtenues par optimisation pour les 256 scénarios testés pour mesurer l'impact de la qualité des données d'entrée. ..... *- 242 -*

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales données utilisées et disponibles pour l'ensemble de la zone d'étude.....- 69 -
Tableau 2 : Granulométrie et teneur en matière organique des sols. .....- 72 -
Tableau 3 : Synthèse des données disponibles pour les 7 piézomètres utilisés. ...- 73 -
Tableau 4 : Caractéristiques de l'échantillon d'agriculteurs rencontrés.....- 81 -
Tableau 5 : Données socio-économiques collectées. .....- 85 -
Tableau 6 : Valeurs de référence pour l'efficience d'application η_a.....- 96 -
Tableau 7 : Efficiences et effets d'usage mesurés pour les deux techniques d'application.....- 99 -
Tableau 8 : Moyennes et écarts types des efficiences et effets d'usage mesurés pour les trois groupes identifiés.. .....- 100 -
Tableau 9 : Résultats de l'implémentation de l'approche ESR pour toutes les combinaisons de variables testées. .....- 119 -
Tableau 10 : Synthèse du premier jeu de données utilisé pour l'approche ESR (jeu de données complet). .....- 120 -
Tableau 11 : Synthèse du second jeu de données utilisé pour l'approche ESR (toutes les exploitations du premier jeu de données dont la taille officielle est inférieure à 100 ha).....- 121 -
Tableau 12 : Résultats de l'implémentation de la méthode ESR pour le jeu de données complet.....- 123 -
Tableau 13 : Résultats de l'implémentation de la méthode ESR pour le jeu de données limité aux exploitations de moins de 100 ha.. .....- 124 -
Tableau 14 : Taille critique de l'exploitation [ha] pour le passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte.....- 128 -
Tableau 15 : Paramètres du modèle de bilan hydrique et valeurs par défaut de ces paramètres.. .....- 135 -
Tableau 16 : Dates pivots et valeurs de K_c leur correspondant pour les cultures considérées dans le modèle.....- 143 -
Tableau 17 : Résultats de la procédure de calibration pour différentes fonctions objectif.......- 151 -*
Tableau 18 : Variation moyenne mensuelle du niveau théorique de la nappe avec pluie et drainage latéral uniformes (facteur p fixe), irrigation totale moyenne mensuelle, eau d'irrigation drainée moyenne mensuelle et rapport entre l'eau d'irrigation drainée et l'irrigation totale pour trois périodes correspondant à trois phases de développement de la technologie goutte-à-goutte.. .....- 160 -
Tableau 19 : Spécificités de l'irrigation gravitaire ou goutte-à-goutte.....- 180 -

Tableau 20 : Documents consultés pour établir une liste d'indicateurs des performances de l'irrigation utilisée pour sélectionner des indicateurs à même d'évaluer les critères non-évalués.....- 183 -
Tableau 21 : Piliers et principes identifiés dans le cadre SAFE..- 184 -
Tableau 22 : Principes conservés pour l'évaluation des performances de l'irrigation et critères qui y sont associés dans le cadre SAFE .....- 190 -
Tableau 23 : Critères du pilier environnemental conservés pour l'évaluation des performances de l'irrigation et indicateurs qui y sont associés.....- 192 -
Tableau 24 : Critères des piliers économique et social conservés pour l'évaluation des performances de l'irrigation et indicateurs qui y sont associés .....- 194 -
Tableau 25 : Indicateurs sélectionnés pour évaluer les performances de l'irrigation du point de vue de l'agriculteur dans le contexte de la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans le CMV103.....- 201 -
Tableau 26 : Synthèse des valeurs obtenues pour les indicateurs de performance de l'irrigation .....- 206 -
Tableau 27 : Synthèse des résultats des analyses de la variance ANOVA .....- 207 -
Tableau 28 : Synthèse des résultats de l'implémentation de la méthode ESR pour les indicateurs 9 (nombre d'espèces cultivées), 12 (nombre de sources de revenu) et 18 (indépendance par rapport aux contrats).....- 208 -
Tableau 29 : Nombre de jours de stress hydrique par an .....- 212 -
Tableau 30 : Synthèse des principales données existantes et potentiellement utilisables dans le cadre d'études liées à l'irrigation dans le périmètre de la plaine des Triffa (Maroc Oriental). .....- 227 -
Tableau 31 : Efficience de l'irrigation η calculée à l'échelle parcellaire et incertitudes associées à ces valeurs .....- 236 -
Tableau 32 : Impact de la qualité des données d'entrée sur les paramètres et résultats du modèle.. .....- 238 -
Tableau 33 : Moyennes et écarts types des pourcentages d'eau d'irrigation pompée en fonction des scénarios testés pour mesurer l'impact de la qualité des données d'entrée : influence de K_c et de l'efficience de l'irrigation η.....- 239 -

Introduction

Les ressources en eau sont aujourd'hui sous pression dans plusieurs régions du globe. Dans ces différentes régions, l'agriculture est fortement dépendante de l'irrigation et est par ailleurs la principale source de consommation d'eau douce. Ces deux affirmations suffisent à elles seules à justifier l'énergie croissante que les acteurs de l'agriculture consacrent à réduire l'impact de l'agriculture irriguée sur les ressources en eau.

De nombreuses pistes sont étudiées, testées et appliquées pour répondre à ce défi. La technologie goutte-à-goutte est une de celles-ci. Plusieurs études montrent en effet un potentiel d'économie d'eau important lors de la conversion de systèmes d'irrigation traditionnels à cette technologie. La promotion de ce système est dès lors une des mesures les plus fréquemment évoquées pour atteindre l'objectif d'une irrigation économe en eau. Cet état de fait est toutefois l'objet de nombreux débats, la traduction des conclusions de ces études en résultats concrets étant loin d'être évidente.

La thèse ici présentée prétend alimenter ce débat. La science de l'irrigation est complexe et multiple, à la croisée des sciences de la nature, des sciences économiques et des sciences sociales. Il est donc opportun de faire le point sur le potentiel de cette technologie en terme d'impact sur les ressources en eau d'une part mais aussi dans une perspective plus large qui intégrerait la multiplicité des préoccupations des acteurs de l'agriculture. De cette manière, une réponse quantifiée sera non seulement apportée à la question du potentiel de cette technique en terme d'économie d'eau mais l'ouverture de cette réponse apportera de nouvelles pistes d'exploration qui dépassent les frontières des disciplines concernées.

La thèse défendue est que les objectifs effectivement poursuivis par les agriculteurs adoptant cette technologie divergent des objectifs déclarés d'économie d'eau. Pour cette raison, le déploiement de cette technique ne serait pas en mesure de permettre une économie d'eau à grande échelle. Notre démonstration passe par l'analyse d'un cas concret, le périmètre irrigué de la plaine des Triffa au Maroc Oriental. Nous commencerons par y quantifier l'impact réel de cette technique sur l'*efficience* et sur la performance de l'irrigation. Nous tenterons ensuite d'expliquer les résultats obtenus en analysant les objectifs, supposés divergents, des gestionnaires de l'irrigation et des agriculteurs eux-mêmes, apportant ainsi un éclairage nouveau sur cette question.

La littérature scientifique s'accorde sur trois constats qui expliquent la divergence entre le potentiel d'économie d'eau associé au goutte-à-goutte et l'absence de réduction de consommation observée lorsque cette solution est mise en place. Le premier est que les études en conditions réelles sont rares. Le deuxième, qui découle du premier, est que l'impact de la gestion de l'irrigation est fréquemment négligé. Enfin, le troisième est qu'une extrapolation des observations parcellaires à l'échelle régionale entraine des effets d'échelles qui sont souvent passés sous silence.

Le travail ici présenté repose sur ces constats. En calculant précisément l'efficience réellement obtenue par les agriculteurs, une réponse est apportée au manque d'étude en conditions réelles. La confrontation entre la technique d'irrigation utilisée, l'efficience mesurée et les pratiques des agriculteurs permet alors de quantifier l'importance de la gestion et de la caractériser. Les résultats obtenus peuvent ensuite être généralisés à travers un modèle représentant le fonctionnement hydrologique de la zone d'étude de manière à étudier valablement l'impact de la technique d'irrigation sur les ressources en eau régionale. L'impact réel de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte en termes de consommation d'eau sera alors quantifié au niveau de l'exploitation en intégrant les aspects de gestion mais aussi à plus large échelle en intégrant la spécificité hydrologique de la zone étudiée.

L'irrigation ne se limite pas à la consommation d'eau et de nombreux auteurs soulignent les enjeux agro-économiques mais aussi socio-culturels qui influencent les pratiques d'irrigation. Afin d'appréhender la problématique de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte dans son ensemble mais surtout de comprendre les motivations réelles des agriculteurs adoptant ou refusant cette technologie, la performance de l'irrigation doit être étudiée en intégrant ces différents aspects. De cette manière, les moteurs réels et profonds gouvernant le processus d'adoption de la technologie goutte-à-goutte seront identifiés.

Dans ce document, le fonctionnement d'une série d'exploitations de la zone d'étude est étudié et l'efficience réellement obtenue y est quantifiée à l'échelle de la parcelle. Cette efficience est ensuite décomposée afin de quantifier l'influence relative de la gestion, qui est alors analysée et modélisée au regard des caractéristiques de ces exploitations. Les résultats ainsi obtenus permettent la généralisation de ces observations pour l'ensemble des exploitations de la zone d'étude puis, à l'aide d'un modèle hydrologique, sont enfin traduits en termes d'impacts sur les ressources en eau régionales.

Dans un second temps, un cadre d'évaluation des performances de l'irrigation, au sens large, est établi. Les performances de l'irrigation sont alors caractérisées pour les exploitations étudiées et confrontées à la technique d'irrigation. De cette manière, les principales avancées qui résultent de l'adoption de la technologie goutte-à-goutte pour l'agriculteur sont identifiées. Ces avancées sont alors comparées aux objectifs déclarés de la conversion par les agriculteurs et les gestionnaires afin d'apporter une réponse à la thèse formulée.

Sur le plan méthodologique, notre approche se veut cohérente et adaptée à la réalité. La prise en compte explicite de la disponibilité des données et une certaine simplicité dans la représentation des processus, qui permette aux principaux acteurs de terrain de s'approprier les résultats obtenus, guideront notre approche. La méthode ainsi implémentée pourra inspirer de futurs travaux portant sur des thématiques similaires.

Cette thèse s'articule en plusieurs étapes. Dans le premier chapitre, les jalons de la réflexion sont posés avec un bref rappel des principes de l'irrigation et du contexte dans lequel s'inscrit ce travail. Une synthèse de l'état de la recherche sur la question traitée est ensuite présentée. Sur cette base, la thèse défendue est alors clairement formulée, suivie par une explicitation des objectifs et des hypothèses qui en découlent. La méthodologie développée pour valider ces hypothèses est présentée.

Une description de la zone d'étude est présentée au deuxième chapitre. Elle permet de correctement appréhender les analyses proposées par la suite. S'ensuit une présentation du processus d'acquisition des données, problématique récurrente dans le domaine de l'irrigation. Ces données sont ensuite décrites et une première analyse en est réalisée.

Le troisième chapitre aborde la question de l'*efficience de l'irrigation*, soit les aspects purement techniques liés à l'utilisation d'eau d'irrigation. Une approche progressive, en trois parties, permettra de faire le point sur le potentiel d'économie d'eau qui peut être associé à la conversion de l'irrigation gravitaire traditionnelle à l'irrigation goutte-à-goutte. Une méthodologie originale sera développée, couplant modèles hydrologiques et économiques, afin d'offrir une analyse statistiquement adaptée aux données utilisées, qui sont à la fois interdépendantes et peu abondantes. La quantification de l'influence de la gestion par rapport aux aspects techniques apportera par ailleurs une réponse claire à un problème fréquemment mentionné mais rarement considéré. Enfin, l'intégration de ces résultats avec la prise en compte des spécificités hydrologiques de la zone étudiée illustrera

la nécessité d'une telle analyse pour évaluer l'impact global d'une modification d'efficience locale.

Le quatrième chapitre élève le débat au niveau des performances de l'irrigation, concept plus large que la notion d'*efficience* et qui intègre donc les aspects environnementaux, économiques et sociaux. La mise en place d'un processus d'évaluation des performances de l'irrigation apportera ainsi des éclairages sur l'impact réel de la technique d'irrigation sur les performances du système. La confrontation de cet impact aux objectifs des différents acteurs constituera une piste supplémentaire pour expliquer l'échec du déploiement de la technologie goutte-à-goutte comme une mesure d'économie d'eau.

Enfin, le cinquième chapitre permet de revenir sur la problématique des données, récurrente dans le document et dans le domaine de l'irrigation. Le traitement spécifique réservé à cette question est présenté et l'impact de la faible qualité des données est quantifié et analysé. La méthodologie développée est ainsi évaluée au regard de cette problématique.

Chapitre 1 – Contexte et objectifs

1.1 - Contexte

Irrigation : généralités

De plus en plus de pays ou de régions à travers le monde font aujourd'hui face à un problème d'accès insuffisant à de l'eau douce de qualité. A l'échelle nationale, la notion de stress hydrique est évoquée lorsque les ressources en eau disponibles sont inférieures à 1700 m³ par an et par personne. 25% des pays du monde se trouvent dans cette situation (FAO 2014). Un autre indicateur fréquemment utilisé pour caractériser la situation hydrique à l'échelle nationale est le pourcentage de ressources en eau disponibles prélevé. La situation est considérée comme critique lorsque ce pourcentage dépasse 20%, ce qui est le cas dans 23% des pays du monde (FAO 2014). Les régions les plus touchées sont le Moyen-Orient, l'Afrique du Nord et l'Asie Centrale, auxquelles peuvent être ajoutés l'Afrique du Sud et le sud-ouest de l'Amérique du Nord (FAO 2011).

Dans ces différentes régions, l'agriculture est fortement dépendante de l'irrigation. Ainsi, 49% des superficies récoltées sont irriguées en Asie de l'ouest, 43% en Afrique du Nord et 43% en Asie centrale (FAO 2011). La proportion de l'eau prélevée destinée à l'agriculture est d'ailleurs supérieure à 80% en Asie et en Afrique (FAO 2014). Ces chiffres illustrent à quel point, dans ces régions, la question de l'accès à l'eau est liée à l'agriculture irriguée. La gestion de l'eau et du problème de stress hydrique en général passe donc inévitablement par la gestion de l'irrigation, d'autant que les perspectives ne sont pas favorables. Une augmentation de la demande en eau agricole de l'ordre de 22 à 74% est par exemple attendue pour la fin du siècle dans les pays du sud de la Méditerranée à cause du changement climatique et de la croissance démographique (Fader et al. 2016).

Au-delà des questions liées à la consommation d'eau et à la production agricole, l'irrigation revêt une importance particulière dans les pays où elle est fortement développée. Au niveau local, un grand nombre de services et/ou d'externalités peuvent ainsi être observés lorsque de grands systèmes d'irrigation sont alimentés par un réseau de canaux. Parmi ceux-ci, on retrouve l'apport d'eau domestique, la recharge des nappes souterraines, le soutien aux activités de pêche par la présence de canaux et réservoirs, l'apport d'eau pour le bétail, des impacts environnementaux parfois

favorables et parfois néfastes (recharge des nappes souterraines, remontée de nappes, salinité, drainage, alimentation des rivières naturelles…), le soutien à de nombreuses activités de loisir, un impact sur la santé et l'hygiène, etc. Bien que ces services ne soient pas toujours planifiés ni même clairement identifiés, nombre d'entre eux existent réellement dans la plupart des périmètres irrigués. Une étude de la FAO a ainsi montré que, sur 28 périmètres irrigués analysés à travers le monde, seuls 2 pouvaient être considérés comme « à usage unique », c'est-à-dire que l'apport d'eau d'irrigation était le seul service effectivement fourni par ces périmètres (Renault et al. 2013).

Sur le plan géopolitique également, le rôle de l'agriculture n'est plus à démontrer. (Blanc 2015) liste ainsi 6 fonctions géopolitiques évidentes des systèmes agraires, à savoir une fonction nourricière (la production de nourriture), une fonction spatiale (l'organisation et la gestion de l'espace), une fonction horogénétique (le dessin des frontières), une fonction politique, une fonction identitaire et une fonction hydro-politique (la *guerre de l'eau*). Dans les pays concernés, ces fonctions sont donc intimement liées à la présence des systèmes d'irrigation, principalement à cause de la forte influence de ces systèmes sur l'agriculture.

Historiquement, les premières traces de l'irrigation remontent à environ 6000 ans en Mésopotamie, à cheval sur l'Irak et l'Iran actuels (Khan et al. 2006). Depuis lors, la technique s'est peu à peu répandue à travers le monde. Avec un taux de croissance particulièrement élevé entre les années 1950 et 1970, elle atteint un total de plus de 324 millions d'hectares équipés pour l'irrigation en 2012 (dont environ 261 millions d'hectares sont effectivement irrigués). Cela représente 21% des terres cultivées et 40% de la production agricole mondiale, dont la moitié se trouve en Chine et en Inde (FAO 2014; Siebert et al. 2015). On estime que l'agriculture irriguée représente près de 70% de la consommation mondiale d'eau douce (FAO 2014).

L'irrigation peut être définie comme l'apport d'eau aux plantes cultivées pour permettre leur développement normal lorsque les conditions de pluviométrie naturelle sont insuffisantes. Dans les zones arides, cet apport est indispensable à la croissance de la plante et on parle alors d'*irrigation totale*. Dans d'autres cas, lorsque la pluviométrie naturelle permet le développement de la plante, l'irrigation peut être pratiquée ponctuellement pour assurer un apport d'eau suffisant à certains stades de développement critiques de la plante de manière à garantir les objectifs de rendement. On parle alors d'*irrigation de complément*. Enfin, certaines pratiques culturales

industrielles exigent de l'irrigation. On parle ici d'*irrigation de précision* (Javaux 2012).

De la source au champ, l'apport d'eau d'irrigation se fait selon un schéma similaire, qui peut être décomposé en trois étapes : le prélèvement d'eau, son transport et son application sur la parcelle cultivée. Chacune de ces étapes peut par contre être réalisée d'une multitude de manières.

Le prélèvement d'eau consiste à prélever l'eau dans son milieu naturel et à la détourner pour l'irrigation. Ce prélèvement s'effectue soit depuis un réservoir d'eau de surface (un lac), soit depuis une rivière, soit depuis une nappe d'eau souterraine.

Le prélèvement d'eau depuis une rivière est la méthode la plus simple à mettre en œuvre. Elle suppose néanmoins que le débit disponible dans la rivière soit suffisant. Dans la plupart des zones semi-arides, les périodes de haut débit correspondent aux périodes les plus pluvieuses, périodes durant lesquelles l'irrigation est superflue. En période sèche, le débit y est insuffisant pour permettre le prélèvement de grosses quantités. Le prélèvement d'eau dans les rivières est donc réservé aux cours d'eau importants qui présentent un débit important même en saison sèche.

Pour remédier à ce problème, il est nécessaire d'utiliser un réservoir qui permet d'intercepter l'eau lors des saisons humides et de la stocker jusqu'aux saisons sèches, périodes durant lesquelles elle sera utilisée pour l'irrigation. La constitution de tels réservoirs passe par la construction d'ouvrages hydrauliques sur le cours d'eau, comme des barrages, des digues, etc. L'eau est artificiellement retenue derrière ces ouvrages et est ainsi disponible lorsque le besoin est maximal, en saison sèche. Cette solution est très efficace mais présente des couts importants (construction, maintenance, gestion…) et une durée de vie limitée à cause de la sédimentation qui comble inévitablement la zone de stockage artificiellement construite. La construction de tels ouvrages pose par ailleurs des problèmes environnementaux non négligeables (perte de biodiversité en aval à cause de la perturbation du fonctionnement hydrologique naturel du cours d'eau, obstacle physique que représente un tel ouvrage et qui complique la circulation des espèces animales et des embarcations, inondation artificielle de surfaces importantes, pertes d'eau importantes par infiltration et évaporation, etc.). Elle offre toutefois de nombreuses opportunités qui ne concernent pas directement l'irrigation (accès à une réserve d'eau potable pour la consommation humaine, production d'hydro-électricité, régulation du débit en aval et contrôle des inondations, création d'un lac pouvant servir de zone de pêche et d'espace récréatif, etc.) (WCD 2000).

La construction d'un réservoir artificiel n'est donc pas toujours la solution la plus appropriée. L'utilisation d'un réservoir naturel peut dès lors être intéressante. Ce réservoir peut être un lac naturel mais, dans la grande majorité des cas, il s'agit d'une nappe d'eau souterraine. La mobilisation d'eau souterraine nécessite une certaine infrastructure (puits ou forage, équipement de pompage) mais présente de nombreux avantages. L'eau souterraine est généralement de bonne qualité, les coûts de transports sont faibles, voire inexistants lorsque la nappe est située sous la zone cultivée, les pertes par évaporation sont généralement faibles et, une fois l'équipement de pompage installé, l'exploitation est aisée. L'exploitation de l'eau souterraine pour l'irrigation est donc pratiquée dans de très nombreuses régions du globe. Malheureusement, le suivi des flux entrant et sortant des nappes souterraines est extrêmement compliqué et la gestion de ces nappes est donc le plus souvent inexistante. Leur épuisement suite à leur surexploitation est donc fréquent, ce qui peut entrainer de nombreux problèmes (diminution du niveau de la nappe, couts de pompage accrus, diminution du débit dans les cours d'eau, diminution de la qualité de l'eau, etc.) (Konikow and Kendy 2005).

Le transport de l'eau depuis la zone de prélèvement jusqu'à la parcelle cultivée peut prendre différentes formes et les distances parcourues peuvent varier de quelques mètres (lorsque les parcelles longent le cours d'eau ou que l'eau est pompée dans la nappe souterraine sous la parcelle) à plusieurs centaines de kilomètres. Le transport peut se faire par voie gravitaire, directement par la rivière ou *via* un réseau de canaux spécifiquement conçus pour l'irrigation. Il peut également se faire à travers un réseau de canalisations à l'aide d'un système de pompage. L'eau est alors distribuée sous pression, comme c'est le cas pour l'eau de distribution dans la plupart des zones urbanisées. Un système mixte peut également être mis en place.

Enfin, une fois l'eau arrivée dans l'exploitation, elle doit être répartie sur l'ensemble de la parcelle cultivée. Ici aussi, de nombreuses méthodes existent. Ces méthodes sont souvent classées en trois catégories : irrigation gravitaire, irrigation par aspersion et irrigation localisée.

L'irrigation gravitaire consiste à laisser l'eau s'écouler naturellement sur la parcelle et pénétrer le sol par infiltration. La surface de la parcelle doit être aménagée de manière à permettre l'écoulement de l'eau sur l'ensemble de la parcelle et son infiltration au niveau des plantes. Divers types d'aménagements existent, des plus simples aux plus élaborés. Le sol stocke une certaine quantité d'eau et la plante puise cette eau en fonction de ses besoins. L'opération est répétée à intervalles espacés de quelques jours à

quelques semaines en fonction de la capacité de stockage du sol et de la demande en eau des plantes, qui varie principalement en fonction de l'espèce et des conditions climatiques. Cette technique est assez simple à mettre en œuvre mais nécessite une main d'œuvre importante. Elle convient à toutes les cultures. Elle est généralement pratiquée dans les systèmes traditionnels partout dans le monde. Elle est par ailleurs systématiquement appliquée à la culture de riz, de manière très particulière. L'eau d'irrigation devant s'écouler sur l'ensemble de la parcelle, l'uniformité de l'apport d'eau est assez faible, les quantités apportées au niveau de l'entrée du champ étant souvent plus importantes que dans les parties les plus éloignées. Une portion importante de l'eau appliquée s'infiltre ainsi en profondeur, hors de la zone accessible par les racines.

L'irrigation par aspersion consiste à asperger l'eau par-dessus la culture au moyen d'un dispositif dédié. Cette technique simule ainsi un épisode de pluie et l'eau aspergée s'infiltre dans le sol. Cette technique convient donc à la plupart des cultures. Le dispositif nécessite de mettre l'eau sous pression puis de l'amener au niveau des asperseurs. Ces asperseurs peuvent être des asperseurs rotatifs répartis sur l'ensemble de la parcelle (*sprinklers*) ou peuvent être disposés sur une rampe d'aspersion mobile qui parcourt la parcelle de bout en bout (rampes d'aspersion) ou autour d'un axe central (pivot central). L'irrigation par aspersion nécessite donc une installation appropriée couplée à une station de mise sous pression. Cette exigence d'infrastructure fait que cette technique est souvent utilisée sur des parcelles de grande taille. Elle est par exemple très répandue en Californie. L'application d'eau est ici très uniforme sur l'ensemble de la parcelle et l'infiltration hors de la zone racinaire peut donc être limitée. L'opération est répétée à intervalles espacés de quelques jours à quelques semaines en fonction de la demande en eau des plantes et de la capacité de stockage du sol.

L'irrigation localisée consiste à amener l'eau spécifiquement au pied de la plante au moyen d'un dispositif dédié. De cette manière, seule une partie du sol est mouillée et les pertes d'eau par évaporation sont donc limitées. Cette technique n'est cependant adaptée qu'aux cultures présentant un nombre limité de plantes pour une surface donnée, comme les cultures arboricoles et les cultures maraichères. Elle n'est pas adaptée aux cultures dont les pieds couvrent toute la parcelle, comme les céréales, les graminées ou le riz. Le dispositif nécessite de mettre l'eau sous pression puis de l'amener au niveau des pieds des plantes. L'eau est ensuite appliquée très localement soit au niveau du sol à l'aide de micro-asperseurs ou de systèmes de goutteurs qui

déposent l'eau goutte par goutte au pied de la plante, soit directement dans le sol à l'aide d'un réseau de tuyaux souterrains. Seule une petite partie du sol étant alimentée en eau, l'opération doit ici être répétée à intervalles plus rapprochés, une fois par jour lorsque la demande en eau des plantes est importante. Cette technique demande donc une infrastructure importante et une gestion fine de l'apport d'eau. Elle permet potentiellement de limiter les pertes par évaporation et limite fortement l'infiltration d'eau hors de la zone racinaire.

La gestion de l'eau au niveau de l'exploitation agricole est généralement du ressort de l'agriculteur. Il en va parfois différemment du prélèvement d'eau et de son transport jusqu'à l'exploitation. Selon l'accès à la ressource et la législation en vigueur, les modes d'organisation de l'irrigation peuvent différer très fortement. Grossièrement, une infinité de modes d'organisations existent, variant entre deux extrémités. Lorsque l'accès à la ressource est aisé (par exemple lorsque l'exploitation se trouve à proximité d'une rivière ou qu'une nappe d'eau exploitable se trouve sous l'exploitation) et que la législation le permet, l'agriculteur peut être responsable de l'ensemble du processus prélèvement-transport-application d'eau et aucun intervenant extérieur n'est impliqué. A l'inverse, lorsque l'eau est très éloignée ou difficilement accessible et que des infrastructures lourdes sont nécessaires pour permettre l'irrigation, un organisme extérieur centralisé peut être chargé de la gestion et de l'exploitation de ces infrastructures et fournir l'eau aux agriculteurs au niveau de leur exploitation, qui leur est alors facturée ; l'agriculteur n'est donc directement responsable que de l'application sur la parcelle. Entre ces deux extrémités, une multitude de modes d'organisation existent, variant tant au niveau de la lourdeur de l'infrastructure qu'au niveau de la centralisation de la gestion ou de son institutionnalisation.

Politiques de développement des grands périmètres irrigués

L'irrigation existe depuis des millénaires. Néanmoins, cette pratique a connu un développement particulièrement rapide du début des années 1960 à la fin des années 1980. Durant cette période, à l'échelle mondiale, une grosse part des budgets publics agricoles nationaux et plus de la moitié des interventions de la Banque Mondiale pour le secteur agricole étaient dédiées à l'irrigation (FAO 2011). Suite à cette expansion fulgurante, la demande en eau s'est avérée contraignante dans de nombreux grands périmètres irrigués à travers le monde.

L'irrigation est toutefois d'une importance capitale dans ces régions, tant pour sa productivité que sur le plan géopolitique et pour les nombreux services et externalités qu'elle produit. Ni une réduction des superficies irriguées ni un quelconque ralentissement des activités liées à l'irrigation n'y est donc envisageable. Une modification des politiques agricoles s'ensuivit, avec un déplacement de l'attention vers une réduction de la demande en eau de ces périmètres, condition nécessaire au maintien des niveaux de production rendus possibles par ces investissements.

Pour cette raison, l'attention s'est portée, depuis plusieurs années, vers une « optimisation » des pratiques d'irrigation. Cette « optimisation » a pour objectif de diminuer les quantités d'eau d'irrigation utilisées sans diminuer ni les superficies irriguées ni la quantité de produits agricoles qui y est récoltée. L'illustration la plus parlante de cette approche est le fameux slogan *More crop per drop*[1] de le FAO, qui fut lancé en 2003 à l'occasion de l'*année internationale de l'eau douce* et vise à promouvoir une augmentation de l'efficience d'utilisation de l'eau agricole (Northoff 2003).

Afin d'augmenter l'efficience de l'utilisation de l'eau agricole, plusieurs solutions techniques existent. Ces solutions peuvent viser à réduire la demande en eau, à augmenter le rendement des cultures par unité d'eau ou à réduire les pertes en eau. Les solutions fréquemment évoquées sont l'utilisation de variétés peu demandeuses en eau, de systèmes d'irrigations performants et la pratique de l'irrigation déficitaire pour réduire la demande, une meilleure gestion agronomique pour augmenter les rendements, des pratiques de conservation (mulching, travail du sol…), la réutilisation d'eau usée, une meilleure gestion de l'irrigation et une meilleure gestion du stress hydrique pour éviter les pertes et, enfin, le choix de cultures très rentables pour augmenter le revenu (Pereira et al. 2002). Elles peuvent être appliquées à l'échelle de la plante, de la parcelle ou du bassin versant (Kijne 2002).

La littérature scientifique s'accorde sur trois mesures principales qui permettent de réduire la demande en eau tout en maintenant les niveaux de production : l'utilisation d'espèces ou variétés économes en eau, l'utilisation de systèmes d'irrigation « à haute performance » et l'irrigation déficitaire (Pereira et al. 2002). L'implémentation, à grande échelle, de l'une ou l'autre de ces solutions permettrait ainsi de réduire significativement la consommation d'eau de l'agriculture irriguée sans affecter les performances agro-économiques de l'irrigation. Sur cette base, de nombreux pays ou

1 Plus de production par goutte d'eau (traduction libre).

régions concernés ont donc initié des programmes visant à optimiser l'utilisation de l'eau d'irrigation.

Les techniques d'irrigation localisées, dont l'application la plus répandue est la technique du goutte-à-goutte, permettent en théorie d'atteindre des efficiences d'application de l'ordre de 90%, contre 70% pour les systèmes traditionnels les mieux gérés (Tiercelin 2006). Le développement, à grande échelle, de cette technologie permettrait donc en théorie de réduire de plus de 20% la demande en eau d'irrigation.

De nombreux auteurs mettent toutefois en garde contre ce raccourci, alimenté par une confusion, fréquente dans la littérature scientifique (van der Kooij et al. 2013), entre la notion, purement technique, d'*efficience* et le concept de performance (Willardson et al. 1994; Pereira et al. 2002; Perry 2007; Lankford 2012b; Pereira et al. 2012). Ce point de vue est par ailleurs purement technique et est contesté sur le plan économique, une amélioration de l'efficience ne se traduisant que très rarement par une diminution de la consommation (Schneider 2010).

Malgré ces réserves, l'irrigation goutte-à-goutte reste associée à une utilisation raisonnée de l'eau d'irrigation et est perçue par la sphère politique comme un outil facile à implémenter et permettant de réduire significativement les pressions sur les ressources en eau (Boelens and Vos 2012; Knox et al. 2012; Lankford 2012a; van der Kooij et al. 2013). Les politiques de développement se sont donc majoritairement axées sur l'amélioration de l' « efficience » de l'irrigation. Pas moins de 6.2 milliards de dollars ont d'ailleurs été investis par la Banque Mondiale dans l'irrigation entre 1998 et 2008 et la moitié des projets financés avaient pour objectif d'améliorer cette « efficience », une des solutions implémentées étant le déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte (IEG 2012).

A l'échelle mondiale, l'irrigation goutte-à-goutte représente environ 3% des superficies irriguées et reste donc marginale (FAO 2014). Localement, ce phénomène peut par contre prendre une toute autre ampleur. Au Maroc par exemple, la politique de promotion de cette technologie mise en place par le gouvernement dès le début des années 2000 conduit aujourd'hui à ce que 15% des superficies soient irriguées au goutte-à-goutte à l'échelle nationale (Plusquellec and Bachri 2013) et ce chiffre monte aujourd'hui à plus de 25% dans certaines régions (données : ORMVAM 2013). La question de l'aptitude de la technologie goutte-à-goutte à réduire les pressions sur les ressources en eau est donc plus que jamais d'actualité.

Evaluation des performances de l'irrigation

De ces réflexions émerge la question de l'*évaluation des performances de l'irrigation*. Partant du postulat qu'une population de plus en plus importante doit être nourrie dans un contexte où l'eau est de moins en moins disponible, l'agriculture irriguée se doit de répondre à une triple ambition : produire plus de nourriture par unité d'eau consommée, limiter l'impact environnemental de l'agriculture irriguée et améliorer le niveau de vie des agriculteurs (Bos et al. 2005). L'*évaluation des performances de l'irrigation* se veut un outil au service de ces ambitions. Son objectif ultime est de contribuer à une utilisation efficiente et efficace des ressources en fournissant des feed-back appropriés aux gestionnaires des systèmes, et ce à tous niveaux (Bos et al. 2005).

Le processus peut être défini comme « l'observation systématique, la documentation et l'interprétation des activités liées à l'agriculture irriguée avec un objectif d'amélioration permanente » (Bos et al. 2005). Pour atteindre cet objectif, plusieurs auteurs proposent de suivre un cadre strict dont l'application permet d'améliorer les performances du système étudié (Murray-Rust and Snellen 1993; Gorantiwar and Smout 2005; Bos et al. 2005). Pour Bos et al. (2005), la première étape, *objectif et stratégie* (*purpose and strategy*), vise à établir l'objectif et l'approche de l'évaluation des performances. Lors de cette étape sont ainsi définis le public ciblé par l'évaluation, le point de vue adopté (utilisateur, gestionnaire…), le type d'évaluation (interne ou externe) et les limites spatiales et temporelles du travail. Vient ensuite la phase de *conception et planification* (*design and planning*). Cette partie vise à définir les critères et les indicateurs de performances qui seront utilisés, à identifier les données nécessaires, à planifier la collecte de ces données et à définir les résultats attendus. Puis vient la *réalisation* (*implementation*), moment durant lequel les actions planifiées lors de la phase précédente sont réalisées. Enfin, l'*application des résultats* (*application of outputs*) consiste à prendre une série de mesures pour intégrer les conclusions tirées au terme du processus d'évaluation. Une étape d'*évaluation finale* (*further actions*) est recommandée afin de s'assurer que le processus fut fructueux et, le cas échéant, un nouveau cycle d'évaluation doit être entrepris.

Cette démarche présente un certain nombre d'avantages. Elle permet tout d'abord d'être appliquée à n'importe quel type de périmètre irrigué, quels que soient sa structure, son niveau d'institutionnalisation, sa taille. La seule exigence est qu'un organe unique coordonne sa mise en place. Elle permet également d'identifier clairement l'objectif du processus d'évaluation et les

acteurs cibles et permet ainsi de focaliser le processus d'évaluation sur les objectifs définis, évitant ainsi sa dispersion et améliorant ses chances de succès. Enfin, elle ne contraint pas la notion de performance et permet donc l'intégration d'aspects aussi variés que les aspects techniques, sociaux, économiques, environnementaux, institutionnels, stratégiques...

Au-delà de ses avantages, cette approche présente néanmoins certaines limites. Tout d'abord, la mise en place du processus en tant que tel et l'implémentation des conclusions du processus nécessitent soit l'existence d'une forme d'autorité centrale ayant un pouvoir de contrainte sur les acteurs concernés par la mise en place du processus et l'implémentation de ses conclusions, soit l'adhésion de l'ensemble des acteurs concernés à la démarche d'évaluation.

La première option est par exemple de mise dans le cas de l'implémentation du plan *Maroc Vert*, qui vise à économiser l'eau d'irrigation et à augmenter sa productivité en promouvant l'irrigation goutte-à-goutte à l'échelle nationale au Maroc (Maatougoui 2014). Là, les autorités marocaines disposent d'outils législatifs et fiscaux qui permettent l'implémentation et le suivi de la politique décidée. La seconde option fut implémentée dans le cadre du projet *ALTAGUAX*, qui vise à améliorer la gestion de l'eau dans le bassin de l'Andarax en Espagne (Van Cauwenbergh 2014). Une démarche participative fut dans ce cas mise en place pour l'ensemble du processus de manière à assurer l'adhésion des acteurs au processus. Le succès mitigé de ces deux exemples illustre les difficultés inhérentes à la mise en place d'un processus d'évaluation des performances impliquant un nombre important d'acteurs et, surtout, à la mise en application concrète et au suivi des conclusions tirées au terme du processus.

Une seconde limite tient dans la phase de *réalisation* et, en particulier, dans l'accès et la qualité des données. Le nombre de données nécessaires peut être très important et leur collecte fastidieuse. Malano and Burton (2001) listent ainsi plus de 30 données différentes nécessaires pour calculer quelques indicateurs clés, plusieurs de ces données devant être disponibles au pas de temps journalier. La collecte d'un tel jeu de données n'est possible que dans des périmètres dont la gestion est très centralisée et le suivi minutieux, ce qui ne représente qu'un très faible pourcentage des périmètres actuellement en activité.

Nombre d'auteurs soulignent également que les données liées à l'irrigation sont souvent inexistantes, inaccessibles ou de piètre qualité et donc peu fiables (Sam-Amoah and Gowing 2001; Bastiaanssen et al. 2007; Hamid et al. 2011; Kharrou et al. 2013). De nombreux processus d'évaluation ont

d'ailleurs échoué à atteindre les objectifs fixés à cause de ce problème de données (Smith 1990).

La mise en place, la réalisation et le suivi d'un processus d'évaluation des performances de l'irrigation permettent donc une évaluation fine, complète et ciblée de l'état d'un système d'irrigation. Ils rendent également possible l'identification et l'implémentation de solutions concrètes qui permettent d'améliorer les performances du système. Toutefois, il s'agit d'un processus long et fastidieux et de nombreux obstacles existent, qui rendent souvent cette mise en place extrêmement compliquée. L'implémentation d'un tel processus n'est donc que rarement développée, malgré les nombreuses études qui montrent l'intérêt de cette pratique (Malano and Burton 2001; Phadnis and Kulsreshtha 2011; Yakubov 2012).

1.2 – Etat de l'art

Efficience de l'irrigation

L'efficience potentielle de l'irrigation goutte-à-goutte est excellente, de l'ordre de 90 à 95% (Tiercelin 2006; Hassanli et al. 2010; van Halsema and Vincent 2012; Fader et al. 2016). Comme le précise Carr (2014), *le succès de l'irrigation repose sur la capacité d'appliquer la bonne quantité d'eau au bon moment aussi uniformément que possible sur une superficie importante*[2]. Par ses caractéristiques techniques, la technologie goutte-à-goutte permet cela.

En effet, grâce à une variation de débit entre les goutteurs généralement inférieure à 15% lorsque le système est bien entretenu (Tiercelin 2006), l'uniformité de l'application est nettement supérieure à celle d'autres technologies (Pereira et al. 2002; van der Kooij 2016). Par ailleurs, la possibilité d'appliquer, grâce à ce système, la bonne quantité d'eau au bon endroit fait que l'eau appliquée profite essentiellement à la plante (Tiercelin 2006), ce qui permet de réduire les pertes par évaporation et par drainage (van der Kooij 2016).

Toutefois, de telles efficiences ne peuvent être atteintes que si le matériel est bien conçu, bien entretenu et si l'irrigation est bien conduite (Tiercelin 2006; Fader et al. 2016). Or *l'irrigation localisée, malgré ses nombreux avantages, reste une technique sophistiquée, délicate d'emploi et nécessite […] une compétence élevée de la part des utilisateurs* (Tiercelin 2006). Aujourd'hui encore, seule une minorité d'agriculteurs utilise des méthodes objectives pour conduire leur irrigation, la plupart fonctionnant de manière intuitive (Carr 2014). Par exemple, selon un sondage détaillé publié en 2006, seuls 18% des agriculteurs utilisaient une méthode objective de conduite de l'irrigation en Afrique du Sud (Stevens 2006).

Si la technologie goutte-à-goutte permet, en théorie, d'atteindre des efficiences de l'irrigation très élevées, les conditions nécessaires à l'obtention de telles efficiences semblent donc rarement rassemblées sur le terrain (Lankford 2012b). Ce constat, en tant que tel, trouve peu d'écho dans la littérature. Van der Kooij et al. (2013) observent toutefois que la plupart des études scientifiques reposent sur des dispositifs expérimentaux et

[2] *Successful irrigation depends on being able to apply the right quantity of water at the right time as uniformly as possible across what may be a large area.*

laissent donc de côté une variable très importante dans la détermination de l'efficience : les agriculteurs et leurs pratiques[3]. Ils poursuivent en affirmant que *cette procédure* [l'extrapolation des résultats expérimentaux] *devient problématique lorsque de tels résultats sont généralisés pour des situations réelles, en réalisant, de manière inappropriée, des sauts d'échelle et de contexte*[4].

Cette généralisation des résultats expérimentaux et les problèmes qui en découlent, par contre, font l'objet de discussions de plus en plus fréquentes dans la littérature scientifique. Pfeiffer and Lin (2014) mentionnent ainsi que, bien que *de nombreux scientifiques aient appelé à des programmes de soutien aux technologies d'irrigation efficientes (Cooley et al. 2009; Jury and Vaux Jr. 2005; Stubbs 2011; Johnson et al. 2001; Evans and Sadler 2008), peu d'évaluation de ces programmes existent et, parmi ceux qui existent, l'efficacité de ces programmes en termes de réduction de consommation d'eau est sérieusement mise en doute. […] Plusieurs études ont en effet conclu que le passage à une technologie plus efficiente ne réduit pas nécessairement l'utilisation d'eau, et peut même l'augmenter (Ward and Pulido-Velazquez 2008; Scheierling et al. 2006; Peterson and Ya 2005; Huffaker and Whittlesey 2003; Khanna et al. 2002; Hanak et al. 2010)*[5]. Eux-mêmes observent une augmentation des volumes appliqués et pompés lorsqu'une technologie dite plus efficiente fut largement adoptée dans les plaines agricoles du Kansas, et de conclure que *si la conservation* [d'eau] *est réellement l'objectif, les politiques visant une augmentation de l'efficience doivent être examinées de manière critique avec une attention spécifique portée à la réponse en termes de comportement*[6].

Une autre étude montre que, en Inde, les volumes appliqués diminuent significativement avec le déploiement du goutte-à-goutte (Fishman et al. 2015). Mais, là aussi, les résultats observés sont très sensibles au choix des

---

[3] *Results of such experiments leave out a very important 'variable' in determining water efficiencies: farmers and their practices.*

[4] *It also becomes problematic when such findings are generalized for real-world situations, inappropriately jumping scales and contexts.*

[5] *…scientists have called for additional programs to support conversion to more efficient irrigation technology [references]. However, there have been very few evaluations of these programs, and of those that exist, many raise serious doubts about the programs' effectiveness in reducing the consumptive use of water.* […] *several studies have shown that shifting to more efficient irrigation technology does not necessarily reduce total water use, and can even lead to increases in water use [references].*

[6] *If conservation is truly the goal, policies designed to increase irrigation efficiency must be examined critically, with attention paid to behavioral responses.*

agriculteurs et la conclusion selon laquelle la promotion du goutte-à-goutte sans incitant pour promouvoir la conservation de l'eau réduit à néant le potentiel d'économie d'eau associé à cette technologie est tirée. Ces conclusions rejoignent celles de nombreux auteurs qui, suite à l'analyse de la modernisation de l'agriculture en divers endroits de la planète, concluent que l'attention portée aux économies d'eau doit être associée à d'autres mesures, entre autres politiques (H. Darouich et al. 2012; Lopez-Gunn et al. 2012; Rodrigues et al. 2013; Berbel and Mateos 2014). Plus nuancés, Garb and Friedlander (2014) analysent la divergence entre le succès, en Israël, et l'échec, en Afrique sub-saharienne, du déploiement du goutte-à-goutte en insistant sur la dépendance de cette technologie au contexte.

Les résultats de ces auteurs montrent en effet que, même si l'hypothèse d'une meilleure efficience est faite, l'eau potentiellement économisée est utilisée pour augmenter les superficies irriguées ou pour semer des cultures plus demandeuses en eau (Lopez-Gunn et al. 2012; Batchelor et al. 2014; Berbel and Mateos 2014; Pfeiffer and Lin 2014; Fishman et al. 2015). A cet effet, Olmstead (2010) mentionne que les économies d'eau qui découlent des améliorations technologiques sont souvent surestimées, et ce à cause du changement de comportement des utilisateurs. Elle rappelle que les approches économiques apportent, à cet égard, une contribution substantielle et mériteraient d'être plus largement appliquées.

Enfin, plusieurs auteurs appellent à la prudence quant à l'utilisation de la notion d'efficience de la technologie goutte-à-goutte pour justifier un large déploiement de cette technologie, et ce pour deux raisons. Premièrement, la mesure de l'efficience est très sensible à l'échelle de mesure. Au niveau spatial, ce qui peut être considéré comme une perte à l'échelle de la parcelle ne l'est pas obligatoirement à l'échelle du bassin versant par exemple (Willardson et al. 1994; Perry 2011; van Halsema and Vincent 2012; Lopez-Gunn et al. 2012; Lankford 2012b; Batchelor et al. 2014). Certaines études montrent ainsi que l'efficience de l'irrigation peut passer de très mauvaise (30%) à bonne (80%) lorsque la fraction d'eau considérée comme perdue à l'échelle de la parcelle peut être réutilisée (Clarck and Aniq 1993; Guillet 2006; van Halsema and Vincent 2012). Au niveau temporel, la période considérée pour la mesure est cruciale et doit être précisément définie afin de permettre une utilisation correcte de la notion d'efficience (van Halsema and Vincent 2012; Lankford 2012a). Deuxièmement, la distinction entre usage bénéficiaire et non-bénéficiaire pour les plantes est rarement claire dans la définition de l'efficience de l'irrigation et le devenir de l'eau d'irrigation est donc incertain (Perry 2007; Pereira et al. 2012).

Succès de la technologie goutte-à-goutte

L'efficience potentielle de la technologie goutte-à-goutte fait donc l'unanimité. L'efficience réellement obtenue lorsque ce système est utilisé sur le terrain est par contre souvent nettement moindre, en particulier à cause de sa sophistication et du comportement des agriculteurs, qui doivent être intégrés dans toute étude d'impact de cette technologie. Enfin, même dans l'hypothèse où une bonne efficience est obtenue, le déploiement de cette technologie est loin de se traduire systématiquement par une diminution des pressions sur les ressources en eau. Conscients de cet état de fait, de nombreux scientifiques s'interrogent sur les raisons du succès de la technologie goutte-à-goutte et de l'image de technologie « conservatrice en eau » qui l'accompagne.

L'association entre la technologie goutte-à-goutte et l'économie d'eau est en effet fréquente (Khan et al. 2008; Friedlander et al. 2013; Monaghan et al. 2013; H. M. Darouich et al. 2014; Chandran and Surendran 2015; Chandran and Surendran 2016), bien que fréquemment critiquée. De nombreux auteurs notent ainsi que les discours politiques prônant l'*efficience* et la *modernisation* sont courants (Willardson et al. 1994; Olmstead 2010; Boelens and Vos 2012; Lopez-Gunn et al. 2012; van Halsema and Vincent 2012; Berbel and Mateos 2014; Venot et al. 2014).

La littérature scientifique n'est pas en reste. Historiquement, elle faisait explicitement le lien entre irrigation efficiente, en particulier irrigation goutte-à-goutte, et économie d'eau (Fishelson and Rymon 1989; Negri and Hanchar 1989). Aujourd'hui, si ce lien est moins explicite, il n'en demeure pas moins profond, comme le démontrent par exemple van der Kooij et al. (2013). Dans cette analyse de la littérature scientifique relative à l'efficience de l'irrigation goutte-à-goutte, ces auteurs notent une *similitude remarquable de la ligne argumentaire* des articles relus, qui commencent tous par justifier leur recherche sur l'irrigation goutte-à-goutte en faisant état d'un problème ou d'une crise liée à la problématique environnementale globale. Dans plus de la moitié des articles relus, la *pénurie d'eau* est explicitement mentionnée comme étant le problème ou la crise que les auteurs prétendent résoudre. Une majorité des autres articles relus, sans mentionner explicitement la notion de *pénurie d'eau*, font quant à eux appel à une notion s'en rapprochant.

Consciemment ou non, la littérature scientifique entretient donc une certaine image de l'irrigation goutte-à-goutte, l'image d'une technologie qui permet de résoudre des problèmes de disponibilité en eau. Cet état de fait, dénoncé par de nombreux auteurs (Perry 2011; Lankford 2012a; Boelens and Vos

2012; van der Kooij et al. 2013; Batchelor et al. 2014; Pfeiffer and Lin 2014; van der Kooij 2016), est très bien décrit par Venot et al. (2014), qui pointent par ailleurs un autre problème.

> *Dans la majorité de la littérature scientifique portant sur le sujet, l'irrigation goutte-à-goutte est envisagée comme une technologie où le mot 'technologie' est utilisé pour désigner le matériel concerné, à savoir un système composé de tuyaux, de goutteurs et d'appareils annexes. Dans une telle perspective, la technologie existe indépendamment de l'environnement dans lequel elle est développée et utilisée. Ce matériel acquiert alors des caractéristiques intrinsèques et essentielles, valides partout. Par exemple, il est efficient et productif en soi*[7].

La plupart des auteurs mentionnés ci-dessus pointent essentiellement un problème de communication. Lankford (2012a) dénonce ainsi une utilisation confuse du concept d'*efficience de l'irrigation*. Perry (2011) appelle quant à lui à une utilisation soignée du terme *efficience* en particulier, qui est actuellement positivement connoté, tandis que Boelens and Vos (2012) pointent l'apparition d'un jugement normatif suite à l'utilisation de plus en plus répandue de cette notion. Enfin, van der Kooij et al. (2013) situent cette problématique dans le cadre d'une vision, plus large, de modernisation de l'agriculture à laquelle le passage au goutte-à-goutte participerait. Venot et al. (2014) vont plus loin, affirmant que *la vision de l'irrigation goutte-à-goutte comme une innovation fructueuse est non seulement liée à ses soi-disant caractéristiques techniques intrinsèques mais a été activement soutenue par une coalition d'acteurs, qui ont forgé une image positive de l'irrigation goutte-à-goutte qui soutient et renforce leurs valeurs, leurs intérêts et leurs missions*[8].

---

[7] *In most scientific and development literature on the topic, drip irrigation is framed as a technology whereby the term 'technology' is used to designate hardware (i.e. the system composed of plastic pipes and emitters and ancillary devices) that is exemplified by intrinsic features. In such a perspective, technology exists independently from the environment in which it is being developed and used; the drip irrigation hardware acquires essential characteristics, valid everywhere. For example, it is efficient and productive, per se.*

[8] […] *the establishment of drip irrigation as a successful innovation is not only linked to its so-called intrinsic technical features but has been actively pursued by coalitions of actors. These have constructed a positive drip imagery that fits and reinforce their respective values, interests and mandates.*

Primo, une confusion rhétorique est donc courante entre la technologie goutte-à-goutte et ses aspects matériels uniquement. *Secundo*, des études visant à évaluer l'impact du déploiement de cette technologie en conditions réelles et à grande échelle, spatiale et temporelle, manquent cruellement. *Tertio*, la définition et l'utilisation des notions d'*efficience* manquent de clarté. Enfin et *quarto*, il existe une forme de parti-pris, conscient ou non, de la part des acteurs impliqués dans le développement de cette technologie. Ces quatre points seraient ainsi responsables d'une association communément faite entre goutte-à-goutte et économie d'eau, association qui est pourtant loin d'être systématique.

Pour remédier à ce problème, plusieurs solutions sont proposées. En particulier, la clarification des concepts utilisés est recommandée, qu'il s'agisse de la définition précise de la notion d'efficience employée (van Halsema and Vincent 2012) ou des échelles spatiale et temporelle considérées (van Halsema and Vincent 2012; Lankford 2012a). Par ailleurs, la distinction entre usage bénéficiaire et non-bénéficiaire pour les plantes doit être clarifiée (Perry 2007; Perry 2011; Pereira et al. 2012). L'utilisation d'une terminologie non-ambigüe est universellement appelée mais le choix des termes à employer fait débat (Willardson et al. 1994; Perry 2007; Perry 2011; Lankford 2012a; Pereira et al. 2012).

Par ailleurs, afin d'évaluer l'impact réel et à grande échelle du passage à la technologie goutte-à-goutte, trois recommandations sont fréquemment formulées. Tout d'abord, des évaluations doivent être réalisées en conditions réelles, c'est-à-dire dans des conditions où l'irrigation goutte-à-goutte a effectivement été implémentée et est quotidiennement gérée par les agriculteurs (van der Kooij et al. 2013; Pfeiffer and Lin 2014). Ensuite, la prise en compte du comportement de ces agriculteurs et de leur gestion doit être intégrée à l'évaluation (Olmstead 2010; Lopez-Gunn et al. 2012; Carr 2014; Fishman et al. 2015), de même que la différence d'objectifs et de points de vue entre les agriculteurs et les gestionnaires (Knox et al. 2012; Boelens and Vos 2012). Les approches économiques présentent, à cet égard, un potentiel encore trop peu exploité (Olmstead 2010). Enfin, une évaluation fine du devenir de l'eau non-consommée par les plantes doit être réalisée et la modélisation hydrologique est, pour ce faire, un outil incontournable (Willardson et al. 1994; Perry 2011).

Enfin, actant du succès du déploiement de la technologie goutte-à-goutte en Israël, Garb and Friedlander (2014) proposent une réflexion plus profonde en suggérant de remplacer ce *transfert* de technologie par une *traduction* de la technologie (*technology translation*). Cela *suggère une approche plus*

dialogique qui mette l'accent sur l'apprentissage et l'utilisation du « langage » local des contextes dans lesquels les choses seront traduites, ce qui rend ces choses assez souples pour être facilement modifiables, et de trouver des moyens de renforcer les systèmes d'innovation qui permettront de les réinventer et de les relier en de nouvelles relations[9]. En clair, la relation entre la technologie en elle-même et le contexte dans lequel elle s'inscrit est telle qu'un simple transfert est voué à l'échec. La technologie doit être adaptée, « traduite », au nouveau contexte pour qu'elle puisse s'y inscrire avec succès.

Adoption de la technologie goutte-à-goutte

Le déploiement du goutte-à-goutte a pris, ces dernières années, une ampleur considérable. Si, à l'échelle mondiale, cette technique n'est utilisée que sur 3 à 4% des superficies irriguées (Friedlander et al. 2013; FAO 2014), elle peut localement être beaucoup plus largement pratiquée. En Israël par exemple, en 1986 déjà, l'irrigation goutte-à-goutte représentait 30 à 70% des superficies irriguées, selon les régions (Fishelson and Rymon 1989). Au Maroc, la politique de promotion de cette technologie mise en place par le gouvernement dès le début des années 2000 conduit aujourd'hui à ce que 15% des superficies soient irriguées au goutte-à-goutte à l'échelle nationale (Plusquellec and Bachri 2013) et ce chiffre monte à plus de 25% dans certaines régions (données : ORMVAM 2013).

Les qualités les plus fréquemment évoquées par la littérature scientifique pour expliquer le succès de cette technologie sont un potentiel très élevé en termes d'efficience d'utilisation de l'eau (Foltz 2003; Bisconer 2010; Darouich et al. 2012; Friedlander et al. 2013; Rodrigues et al. 2013; Darouich et al. 2014; Garb and Friedlander 2014; Wanvoeke et al. 2016), de rendements (Friedlander et al. 2013; Garb and Friedlander 2014; Chandran and Surendran 2015) et de rentabilité économique (Darouich et al. 2012; Rodrigues et al. 2013; Darouich et al. 2014). Ces qualités expliquent l'attention portée à cette technologie par la plupart des acteurs de l'irrigation, comme le rappellent Venot et al. (2014) en parlant des *revendications universelles qui sont largement associées à cette innovation socio-*

[9] *Technology translation, rather than transfer, suggests a more dialogical approach emphasizing learning and using the local "languages" of the contexts into which artifacts will be translated, making artifacts supple enough to be readily modifiable within these, and finding ways to bolster innovation systems that will re-invent and re-link them into new relationships.*

technologique, notamment celles d'efficacité, de productivité et de modernité[10].

Enfin, l'argument de la lutte contre la pauvreté est également fréquemment évoqué, en particulier pour justifier la promotion de l'irrigation goutte-à-goutte en Inde et en Afrique sub-saharienne (Venot et al. 2014; Wanvoeke et al. 2016). Dans ce cas, les systèmes promus sont alors souvent des systèmes qualifiés de *low-cost*, c'est-à-dire des systèmes simplifiés, qui seraient adaptés à une utilisation sur des exploitations de taille inférieure à 0.1 ha et où l'eau est généralement mise sous pression par simple charge gravitaire, par exemple *via* une colonne d'eau remplie manuellement (Kulecho and Weatherhead 2005; Wanvoeke et al. 2016).

Pour toutes ces raisons et malgré les réticences mentionnées plus haut, le déploiement de cette technique fut encouragé par de nombreux gouvernements et agences de développement et activement promu. En Inde par exemple, sous l'impulsion du gouvernement central, le passage au goutte-à-goutte est en partie financé par des agences régionales depuis 2005. Ce financement, qui varie entre 50 et 75% du cout total selon les régions, a conduit à la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte de 356000 ha entre 2005 et 2009 (Sivanappan 2016). Au Maroc, le Programme National d'Economie d'Eau d'Irrigation (PNEEI) finance 60% des investissements nécessaires à la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte depuis 2006 et ce chiffre est monté à 80 ou 100% (selon la situation) depuis 2010 (Benouniche et al. 2014). Entre 1998 et 2008, 6.2 milliards de dollars ont été investis par la banque mondiale dans l'irrigation et la moitié des projets financés avaient pour but d'améliorer son efficience, une des solutions implémentée étant l'irrigation goutte-à-goutte (IEG 2012). Plusieurs auteurs appellent en effet au déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte en Inde (Chandran and Surendran 2015; Narayanamoorthy et al. 2016) et en Afrique sub-saharienne (Friedlander et al. 2013; Wanvoeke et al. 2016) comme moyen d'amélioration agricole et de lutte contre la pauvreté (Venot et al. 2014).

Les motivations pour soutenir l'irrigation goutte-à-goutte, de la part des instances internationales, des gouvernements nationaux et des agences locales, sont donc multiples. Elles se rapportent principalement aux économies d'eau, aux rendements et à la productivité économique voire, essentiellement en Inde et en Afrique sub-saharienne, à la lutte contre la pauvreté.

[10] […] *the universal claims that have become widely associated with this socio-technological innovation - notably that of efficiency, productivity and modernity.*

Du point de vue des agriculteurs, les choses peuvent par contre être assez différentes. Par exemple, en Algérie, les raisons évoquées par les agriculteurs pour expliquer l'adoption du goutte-à-goutte ont trait à la diminution du temps de travail, à la réduction de la main d'œuvre nécessaire pour le travail au champ et à la possibilité de pratiquer la fertigation (Salhi et al. 2012). En Tunisie, ces raisons concernent la diminution de consommation d'eau, l'augmentation des rendements, la diminution du temps de travail et la réduction de l'utilisation des intrants (Foltz 2003). En Inde, elles concernent une moindre demande de travail, les subsides fournis, des rendements similaires, la carence en eau, une productivité supérieure, l'application de l'eau au bon endroit et la possibilité d'irriguer de fortes pentes (Chandran and Surendran 2015; Chandran and Surendran 2016). D'autres raisons évoquées en Espagne, au Maroc et en Zambie sont liées à la plus grande facilité d'usage, à la réduction des couts de main d'œuvre ou à la possibilité d'irriguer de fortes pentes (van der Kooij 2009; Benouniche et al. 2011; Tuabu 2012; Sese-Minguez 2012; van der Kooij et al. 2013).

Les principaux motifs d'adoption de la technologie goutte-à-goutte explicités par les agriculteurs réfèrent donc principalement à l'organisation du travail facilitée puis à la moindre demande en main d'œuvre, à la moindre consommation d'eau, à la possibilité d'irriguer des parcelles pentues et aux meilleurs rendements. L'organisation du temps de travail et la question de la main d'œuvre sont donc cruciaux dans le choix d'adoption des agriculteurs mais ne se retrouvent pourtant pas dans les principales motivations des instances soutenant le goutte-à-goutte.

Plusieurs auteurs s'intéressent par ailleurs aux raisons de la non-adoption du goutte-à-goutte par les agriculteurs dans des zones où cette technologie est pourtant activement promue. Ainsi, en Chine, ces raisons concernent le manque de stabilité sociale, un ordre de priorité favorisant d'autres stratégies de subsistance, la méconnaissance de la technique, les risques associés aux marchés et des problèmes fonciers (Burnham et al. 2015). En Inde, les couts d'installation, le bouchage des goutteurs, la difficulté d'obtenir des subsides et la peur du changement ou de pertes de rendement sont notées par (Chandran and Surendran 2016). Les raisons relevées en Algérie et en Tunisie concernent les contraintes budgétaires, la difficulté de l'accès au crédit et le manque de temps (Foltz 2003; Alcon et al. 2011; Salhi et al. 2012). La mention du manque de pertinence de la technologie au regard des objectifs poursuivis n'est relevée qu'en Tunisie, où 6% des agriculteurs interrogés évoquent cet argument (Foltz 2003). D'après la littérature, les

raisons de la non-adoption de la technologie goutte-à-goutte, du point de vue des agriculteurs, tiennent donc essentiellement à des contraintes pratiques.

Une autre approche développée dans la littérature pour comprendre le phénomène d'adoption (ou de non-adoption) du goutte-à-goutte consiste à analyser les corrélations entre cette adoption et d'autres caractéristiques. Ainsi, plusieurs auteurs observent des corrélations entre l'adoption du goutte-à-goutte et le niveau de formation des agriculteurs, le contexte social et l'information disponible (Foltz 2003; Alcon et al. 2011; Salhi et al. 2012). En Inde, l'adoption serait défavorisée par une trop longue expérience et par la petite taille des exploitations (Chandran and Surendran 2015; Chandran and Surendran 2016). Les caractéristiques qui influencent l'adoption du goutte-à-goutte portent donc tant sur les agriculteurs (taille de l'exploitation, expérience, formation…) que sur les institutions encadrant l'agriculture (information disponible…) et le contexte social dans lequel s'inscrit l'agriculture.

Enfin, au-delà de l'analyse des déclarations des agriculteurs et des observations statistiques, quelques auteurs étudient plus en profondeur les raisons profondes qui poussent les agriculteurs vers la technologie goutte-à-goutte. Ainsi, Wanvoeke et al. (2016) notent que, au Burkina Faso, l'adoption de la technologie goutte-à-goutte fait partie d'une stratégie globale dont l'objectif est de tirer un maximum de profit des projets de développement ; le principal intérêt de la conversion réside alors dans les avantages latéraux qui en découlent, comme l'accès au crédit favorisé, le prestige social ou l'opportunité que cela représente de créer de nouvelles alliances. Plus tôt, au Kenya, Kulecho and Weatherhead (2005) notaient déjà que l'abandon fréquent de l'irrigation goutte-à-goutte était dû à un manque d'entretien, au contexte culturel défavorable et à un apport en eau peu fiable. Ici, les principales considérations des agriculteurs impliqués dans la dynamique d'adoption ou d'abandon de la technologie goutte-à-goutte seraient donc d'ordre socio-culturel.

Du point de vue des instances soutenant le goutte-à-goutte, les principales raisons de soutenir cette technologie tiennent donc principalement à son potentiel en termes d'économies d'eau, de rendements et de productivité économique. Du point de vue des agriculteurs, la réalité est moins claire. Les raisons explicitées par ces agriculteurs font référence à l'organisation du travail facilitée, à la moindre demande en main d'œuvre, à la moindre consommation d'eau, à la possibilité d'irriguer des parcelles pentues et aux meilleurs rendements. Des corrélations sont par ailleurs observées entre l'adoption de cette technologie et les caractéristiques des agriculteurs (taille

de l'exploitation, formation, expérience…), l'information donnée par les institutions encadrant l'agriculture et le contexte social. Certaines analyses plus poussées montrent enfin que les moteurs profonds de l'adoption du goutte-à-goutte par les agriculteurs seraient d'ordre socio-culturel.

1.3 - Hypothèses, objectifs et méthodologie générale

Objectifs

Sur la base de la littérature, il ressort donc que l'irrigation goutte-à-goutte a un excellent potentiel en termes d'efficience d'utilisation de l'eau. Cette efficience est toutefois soumise à la gestion de l'agriculteur et au contexte global dans lequel la pratique de l'irrigation s'inscrit, est spécifique aux échelles spatiale et temporelle et sa mesure ne permet pas de distinguer l'usage bénéficiaire pour la plante de l'usage non-bénéficiaire.

Le succès incontestable de l'irrigation goutte-à-goutte s'explique donc en partie par une communication trop peu précautionneuse de la part du monde scientifique sur les avantages et les limites de cette technologie. Plusieurs carences sont ainsi pointées du doigt, et 3 recommandations formulées pour mesurer l'impact de son déploiement généralisé. 1. L'efficience doit être mesurée en conditions réelles pour intégrer les aspects contextuels et d'usage. 2. La gestion de l'agriculteur doit explicitement être prise en compte. 3. L'évaluation de l'impact de ce déploiement sur les composantes du cycle de l'eau doit être évaluée finement à l'aide d'outils de modélisation hydrologique.

Enfin, les raisons d'adoption du goutte-à-goutte sont variées. Les instances officielles font la promotion du goutte-à-goutte afin de réaliser des économies d'eau, d'augmenter les rendements agricoles et d'améliorer la productivité économique des exploitations. D'après les affirmations des agriculteurs par contre, la volonté d'adopter le goutte-à-goutte repose surtout sur l'impact de cette technologie en termes de travail quotidien, de main d'œuvre, de consommation d'eau et de rendements. Il semblerait toutefois que leurs motivations profondes, et donc parfois non-explicites, tiennent également à des considérations socio-culturelles, comme le prestige, l'opportunité de créer des alliances, etc.

Notre réflexion part de ce constat. A l'échelle de l'exploitation, l'importance de la gestion est fréquemment soulignée. Elle est par contre très peu quantifiée. Cette absence de quantification laisse planer un doute sur la nécessité réelle de sa prise en compte dans les modèles d'utilisation d'eau. Notre premier objectif consistera donc à quantifier cette influence de

manière à clarifier ce point et à mesurer l'importance relative de la gestion par rapport aux aspects purement techniques.

Le choix de la technique repose, au moins en partie, sur des aspects de gestion (travail quotidien, main d'œuvre…). A l'inverse, la gestion est évidemment elle-même influencée par le choix de la technique. Comprendre plus en profondeur la dynamique qui lie ces deux aspects est donc indispensable pour appréhender finement l'influence relative de la gestion, par rapport aux aspects techniques, telle que quantifiée au premier objectif. Notre deuxième objectif sera donc d'étudier, de manière approfondie et conjointe, la dynamique qui amène à observer la valeur quantifiée de l'influence relative de la gestion sur l'efficience globale de l'irrigation.

De nombreux auteurs soulignent le manque de pertinence d'une extrapolation simple des résultats d'efficience (à l'échelle de la parcelle et sur un laps de temps limité) pour estimer l'impact d'un changement de cette efficience sur les ressources en eau. Peu d'études vont plus loin et les résultats de ces études divergent. La compréhension de la dynamique de gestion réalisée précédemment permet la généralisation des résultats à l'ensemble des exploitations d'un périmètre. L'intégration de ces résultats au sein d'un modèle hydrologique permet alors d'étudier valablement l'effet du déploiement de la technologie goutte-à-goutte sur les ressources en eau d'une région, ce qui constitue notre troisième objectif. Cette évaluation sera réalisée en conditions réelles, intègrera explicitement la gestion de l'agriculteur et se basera sur des processus hydrologiques ; elle rassemblera donc les principales recommandations formulées dans la littérature et sera, à ce titre, pertinente tant sur le plan méthodologique qu'au niveau des résultats obtenus.

Enfin, si les raisons qui sous-tendent la promotion de la technologie goutte-à-goutte de la part des instances officielles sont souvent explicites et donc bien identifiées, les raisons qui poussent les agriculteurs à adopter cette technologie sont quant à elles moins claires et plus variées. Le dernier objectif de ce travail sera donc d'identifier les objectifs réels des agriculteurs pratiquant cette conversion pour notre zone d'étude. La confrontation de ces objectifs réels aux objectifs officiels permettra alors d'expliquer le succès relatif, au regard des objectifs officiels, du déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte dans de nombreuses études et évaluations.

La réalisation de ces objectifs passe par l'analyse de la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans un cas concret : le périmètre irrigué de la plaine des Triffa, situé au nord du Maroc Oriental. La méthodologie appliquée à ce cas d'étude se veut transposable à un grand

nombre de périmètres irrigués à travers le monde et les conclusions méthodologiques se veulent donc généralisables. Néanmoins, les conclusions spécifiques tirées dans ce document concernent principalement ce périmètre en particulier et sont d'ailleurs souvent justifiées par des spécificités locales.

Hypothèses

Afin d'atteindre ces différents objectifs, plusieurs hypothèses doivent être formulées. Ces hypothèses s'articulent autour d'une thèse générale, qui consiste à affirmer que les objectifs généralement déclarés par les gestionnaires du passage à une technologie plus efficiente diffèrent des objectifs effectivement poursuivis par les agriculteurs lors de cette conversion. D'après la littérature scientifique, il s'avère en effet que la conversion au goutte-à-goutte est encouragée par les gestionnaires car elle permettrait, entre autre, d'économiser de l'eau mais que l'adoption du goutte-à-goutte par les agriculteurs se ferait pour d'autres raisons.

Pour répondre au premier objectif, quantifier l'influence de la gestion, il convient d'expliciter cette influence dans l'expression de l'efficience de l'irrigation. La première hypothèse consiste ainsi à formuler l'efficience de l'irrigation η comme le produit d'une efficience technique η_t et d'un effet de gestion (ou *effet d'usage*) e_u. Il ressort dès lors que $\eta = \eta_t * e_u$, où η_t représente l'efficience technique moyenne du système d'irrigation et où e_u représente la gestion de ce système par l'agriculteur, gestion qui conduit à des valeurs d'efficience de l'irrigation η qui s'écartent plus ou moins de l'efficience technique moyenne.

Si l'efficience de l'irrigation η ne peut physiquement être supérieure à 100%, l'effet d'usage e_u peut quant à lui prendre des valeurs supérieures à 100%, pourvu que le produit $\eta_t * e_u$ reste inférieur à 100%. Des valeurs de e_u supérieures à 100% indiquent simplement que, grâce à une gestion appropriée, l'agriculteur obtient des valeurs d'efficience de l'irrigation η supérieures à l'efficience technique moyenne η_t de son système.

L'efficience technique η_t est le produit de l'efficience de transport η_d et de l'efficience d'application η_a (Van Halsema et Vincent, 2012) et nous écrirons dès lors $\eta_t = \eta_d * \eta_a$. A l'échelle de la parcelle, seule l'application est considérée, ce qui donne donc $\eta_t = \eta_a$ l'efficience d'application moyenne de la technique considérée. La quantité d'eau appliquée à la parcelle (I) vaut $NIWR/\eta$ avec $NIWR$ les besoins nets en eau de la plante. Cette formulation mathématique permet donc de quantifier l'influence de la gestion, ici représentée par l'effet d'usage e_u, à l'échelle de la parcelle : $e_u = (NIWR/I)/\eta_a$.

Le deuxième objectif est de représenter la dynamique qui lie cet effet d'usage à la technique d'irrigation. Pour répondre à cet objectif, la deuxième hypothèse consiste à poser une variable M qui représente la gestion de l'agriculteur. Cette variable est endogène par rapport au type d'irrigation. En effet, le choix du type d'irrigation résulte évidemment de la gestion de l'agriculteur mais influence également, en retour, cette gestion de l'agriculteur. Il devient dès lors possible de formuler l'effet d'usage comme une fonction de cette gestion $e_u(M)$ puis d'ajuster cette fonction selon le type d'irrigation. L'efficience de l'irrigation devient alors $\eta = \eta_t * e_{u_Ti}(M_{Ti})$ avec T la technique d'irrigation i et M_i la gestion de l'agriculteur compte tenu de la technique d'irrigation pratiquée, l'irrigation gravitaire ou le goutte-à-goutte dans notre cas particulier. La quantification des fonctions d'efficience d'usage et de la gestion de l'agriculteur pour chacun des types d'irrigation $e_{u_T1}(M_{T1})$ et $e_{u_T2}(M_{T2})$ permet alors d'atteindre le deuxième objectif.

Le troisième objectif consiste à étudier valablement l'effet du déploiement de la technologie goutte-à-goutte sur les ressources en eau régionales. Pour ce faire, le calcul de la valeur d'effet d'usage pour chaque agriculteur de la zone d'étude est nécessaire avant d'implémenter ces résultats dans un modèle hydrologique. Les fonctions d'effet d'usage $e_{u_T1}(M_{T1})$ et $e_{u_T2}(M_{T2})$ obtenues précédemment permettent ce calcul et aucune nouvelle hypothèse n'est nécessaire pour atteindre cet objectif.

Le quatrième objectif vise à identifier les objectifs réellement poursuivis par les agriculteurs adoptant la technologie goutte-à-goutte. Or, comme l'indique les premières hypothèses formulées, un changement de technique d'irrigation induit un changement d'efficience technique mais aussi un changement d'effet d'usage et de gestion. La troisième et dernière hypothèse consiste à affirmer que l'objectif des agriculteurs impliqués dans le processus de transition vers l'irrigation goutte-à-goutte tient au moins autant à ces changements d'effet d'usage et de gestion qu'à ce changement d'efficience technique. Une évaluation globale des performances de l'irrigation du point de vue des agriculteurs et une étude comparative de ces performances entre les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire et ceux pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte mettraient donc en lumière les améliorations de performances observées dont seraient déduits les principaux objectifs des agriculteurs adoptant la technologie goutte-à-goutte. Notons dès à présent que l'évaluation des performances de l'irrigation implémentée devra être globale et holistique afin d'appréhender l'ensemble des aspects mentionnés par la littérature, à savoir aussi bien les aspects techniques qu'économiques, sociaux voire culturels.

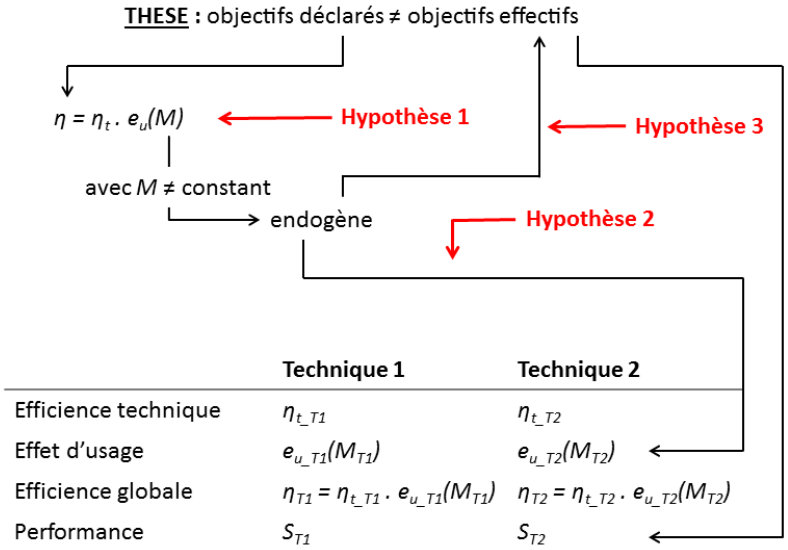


Figure 1 : Vision schématique de la thèse et des hypothèses sous-jacentes (hypothèse 1 : l'efficience globale dépend de l'usage, hypothèse 2 : l'usage dépend, entre autres, de la technique d'irrigation, hypothèse 3 : l'objectif de la conversion est d'ordre socio-économique et réside dans le changement d'usage associé au changement de technique). η représente l'efficience globale, η_t l'efficience technique, e_u l'effet d'usage, M la gestion de l'agriculteur et S les performances globales de l'irrigation (la durabilité du système du point de vue de l'agriculteur). Les indices $T1$ et $T2$ renvoient aux deux techniques d'irrigation.

Pour résumer (figure 1), la thèse défendue est que les objectifs déclarés du changement de technique d'irrigation, ici l'économie d'eau, diffèrent des objectifs effectifs. Pour ce faire, trois hypothèses sont posées. Primo, l'efficience de l'irrigation, à terme, dépend de la technique mais également de l'usage qui est fait de ce système, usage qui dépend lui-même de la gestion de l'agriculteur [$\eta = \eta_t * e_u(M)$]. Le seul passage à une technique potentiellement plus efficiente ne suffit donc pas à diminuer l'utilisation de l'eau. Deuxio, un changement de technique implique un changement de gestion [la gestion est une variable endogène] mais également une nouvelle relation entre cette gestion et l'effet d'usage. L'effet d'usage doit donc être exprimé en fonction de la technique d'irrigation [$e_{u_T1}(M_{T1})$ et $e_{u_T2}(M_{T2})$]. Tertio, ce changement de gestion est précisément l'objectif effectivement poursuivi par les agriculteurs lors du changement de technique d'irrigation, qui diffère donc bien de l'objectif déclaré par les gestionnaires (l'économie

d'eau). La quantification de l'amélioration des performances de l'irrigation liée au changement de technologie doit donc intégrer cette "gestion" et ainsi dépasser les aspects techniques et intégrer les aspects socio-économiques.

Remarque sémantique

Afin de clarifier la suite du document, il convient de faire ici le point sur l'utilisation des termes « efficience » et « performance ». De nombreuses discussions existent quant aux implications de l'utilisation de ces deux termes et à la confusion qui résulte, bien souvent, de leur ambigüité et de la multiplicité de leurs usages (Lankford 2012b; van Halsema and Vincent 2012; Boelens and Vos 2012; Lankford 2012a; Lopez-Gunn et al. 2012). Dans ces études récentes, les points de vue des auteurs, sans être divergents, ne concordent pas parfaitement. Malgré cela, il en ressort les points suivants.

- La notion d'*efficience* renvoie uniquement aux aspects liés à l'eau. L'efficience de l'irrigation est définie comme le rapport entre le volume d'eau d'irrigation consommé par les plantes et le volume d'eau d'irrigation prélevé à la source. Cette définition renvoie au concept d'*irrigation efficiency* originel (Burt et al. 1997). Dans la mesure où tant les volumes appliqués que les moments d'application influencent sa valeur, cette dernière dépend de facteurs techniques mais aussi de facteurs de gestion (van Halsema and Vincent 2012).

- La notion de *performance* renvoie, quant à elle, au fonctionnement global de l'irrigation. Elle varie selon les auteurs mais réfère, dans tous les cas, à une notion plus englobante que l'efficience, pouvant intégrer, en plus des aspects liés à l'eau, des aspects agronomiques, financiers, économiques, sociaux, politiques voire stratégiques (Bos et al. 2005). Elle dépasse donc, dans tous les cas, la simple question d'utilisation d'eau.

Les deux principaux chapitres de ce document traitent chacun d'un de ces deux concepts : le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'*efficience* de l'irrigation tandis que le quatrième s'attarde sur les questions de *performance*, selon la distinction décrite ci-dessus. Les définitions formelles de ces deux concepts tels qu'utilisés dans nos calculs sont respectivement données dans les chapitres qui y sont consacrés.

Deux autres concepts sont régulièrement utilisés dans ce document : la notion d'« effet d'usage » et celle de « gestion (*M*) ». Afin de clarifier la lecture du document, le sens donné à ces deux notions est ici présenté :

- L'*effet d'usage* est un terme utilisé pour représenter l'impact, sur l'efficience de l'irrigation, de tout ce qui n'est pas spécifiquement technologique. La distinction entre efficience technique η_t et effet d'usage e_u peut alors être vue en termes d'horizon temporel. L'efficience technique résulte d'un choix posé à un moment donné (le choix d'installer telle ou telle technique d'irrigation) pour une très longue durée (souvent plusieurs années). A l'inverse, l'effet d'usage résulte des différentes actions posées à court terme. Cela comprend par exemple la décision d'irriguer ou non, la durée d'irrigation, la décision de nettoyer le système, de remplacer telle ou telle pièce, etc. Ces actions peuvent être ajustées très rapidement et l'effet d'usage peut donc très facilement être modifié.

- La notion de *gestion* (*M*) est plus floue et réfère à la logique, implicite ou explicite, suivie par l'agriculteur dans la décision de réaliser telle ou telle action. Cette logique d'action, cette *gestion* (*M*), est rarement explicite et ne peut évidemment pas être mesurée. Elle peut, éventuellement, être explicitée par l'agriculteur mais est le plus souvent implicite et largement indéterminée. Elle se révèle à travers les choix quotidiennement posés par l'agriculteur. Sa caractérisation fine n'est possible que par une analyse profonde et critique de ces choix mais certains indicateurs peuvent être utilisés pour en tracer les grandes tendances.

Méthodologie générale et limites du travail

La méthodologie suivie pour remplir les objectifs précités est ici présentée. Cette présentation est nécessaire afin d'appréhender le cheminement suivi dans son ensemble et de saisir pleinement la cohérence globale du travail.

Comme ce fut déjà précisé, l'ensemble du travail a été réalisé à travers l'analyse d'un cas concret, le périmètre irrigué de la plaine des Triffa, situé au nord du Maroc Oriental. La méthodologie appliquée à ce cas d'étude se veut transposable à un grand nombre de périmètres irrigués à travers le monde et les conclusions méthodologiques se veulent donc généralisables.

Néanmoins, les conclusions spécifiques tirées dans ce document concernent principalement ce périmètre en particulier et sont d'ailleurs généralement justifiées par des spécificités locales. Une certaine prudence est donc de mise quant à la généralisation de certaines observations concrètes réalisées dans le cadre de cette étude. La présentation détaillée de la zone étudiée se trouve au chapitre 2.

Le chapitre 3 aborde la notion d'*efficience*. Afin de remplir les objectifs, la première étape est de mettre en place une méthode simple et précise pour évaluer l'efficience globale de l'irrigation η, à l'échelle de l'exploitation, dans le processus de transition de l'irrigation gravitaire vers l'irrigation goutte-à-goutte actuellement en cours dans la plaine des Triffa. La variabilité de cette efficience est ensuite analysée et l'importance de l'usage est ainsi mise en lumière, menant à la notion d'*effet d'usage* $e_u(M)$.

Dans un deuxième temps, la relation entre la gestion M et la technique d'irrigation doit être traitée. Pour ce faire, la relation entre diverses caractéristiques des exploitations et leur effet d'usage est analysée. En considérant ainsi les caractéristiques des exploitations comme des indicateurs de leur gestion M et en confrontant ces indicateurs à la technique d'irrigation utilisée dans l'exploitation, la relation entre technique d'irrigation et gestion M_{Ti} peut être mise en évidence et quantifiée, ce qui permet son intégration dans la notion d'effet d'usage ainsi que sa reformulation en $e_{u_Ti}(M_{Ti})$.

Sur cette base, la transition de l'irrigation gravitaire vers l'irrigation goutte-à-goutte peut être évaluée en termes d'efficience. A partir de là, son impact en termes de pressions sur les ressources en eau régionales est quantifié. Cette analyse passe par la modélisation du cycle de l'eau à l'échelle de la zone d'étude. Elle clôt ce troisième chapitre, qui se focalise sur l'efficience de l'irrigation et permet de répondre, en partie, au quatrième objectif.

Dans le quatrième chapitre du document, notre étude se déplace du niveau de l'efficience au niveau des performances de l'irrigation, concept plus global que l'efficience. La première étape consiste à définir précisément ce qu'il convient d'appeler « performances » et à définir un cadre précis visant à évaluer ces performances pour notre cas d'étude. Les objectifs de ce processus d'évaluation sont alors clairement définis. Ce cadre peut ainsi être utilisé pour élever la réflexion menée jusqu'ici au niveau de l'efficience à un niveau supérieur, intégrant des aspects socio-économiques principalement.

La deuxième étape a pour objet de concevoir et planifier la réalisation de ce processus d'évaluation. Sur la base du cadre identifié, une liste d'indicateurs permettant l'évaluation de la performance de l'irrigation telle que définie

dans le contexte de la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte est établie. Les données nécessaires à la quantification de ces indicateurs sont également identifiées.

Enfin, le processus d'évaluation est implémenté et analysé. Les indicateurs de performance sont quantifiés dans le contexte de l'irrigation gravitaire et dans le contexte de l'irrigation goutte-à-goutte. L'analyse comparative de la performance pour ces deux types d'irrigation permet de mettre en évidence les objectifs effectivement poursuivis par les agriculteurs lors de cette conversion. Cette comparaison est ensuite confrontée aux objectifs déclarés de cette conversion afin d'apporter une réponse à la troisième et dernière hypothèse de ce travail.

En remplissant ainsi les troisième et quatrième objectifs du travail, ce chapitre permet de clôturer cette étude. Un dernier chapitre permet alors de faire le point sur la méthodologie ici proposée et en particulier sur la question des données qui y sont utilisées. Cette question apparait en effet de manière récurrente tout au long du travail et mérite d'être explicitement abordée.

La méthodologie globale ainsi développée permet de répondre aux objectifs fixés pour cette thèse. Cette méthodologie comporte toutefois certaines limites qu'il convient d'expliciter et de garder en tête pour une interprétation lucide des conclusions de ce travail.

La plus évidente des limites est peut-être que cette étude se limite arbitrairement aux aspects quantitatifs. Les questions de qualité, en particulier de qualité de l'eau d'irrigation, n'est pas posée, non qu'elle soit d'une importance secondaire mais bien parce que ni la zone d'étude sélectionnée, en raison de ses spécificités, ni le temps imparti pour réaliser ce travail ne permettent de traiter cette question. Les conclusions de ce travail ne peuvent donc être interprétées qu'en termes de quantité, en gardant en tête qu'une étude plus approfondie mériterait d'être réalisée en intégrant les questions de qualité.

Bien que cette étude se soit étalée sur 6 années, le travail de terrain a été réalisé durant les seules années 2012 et 2013, uniquement au printemps. Un suivi évolutif, dans le temps, des différentes exploitations n'était donc pas possible. L'hypothèse posée est donc que les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire en 2012-2013 sont représentatives des exploitations avant la conversion au goutte-à-goutte et que les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte en 2012-2013 sont représentatives des exploitations après cette conversion. Le processus de conversion est évidemment un processus évolutif, avec un temps d'adaptation nécessaire à

la technologie, et qui influence également les pratiques des agriculteurs n'ayant pas opéré cette conversion. L'hypothèse posée est donc une hypothèse forte. Elle est néanmoins acceptable même si le processus de conversion n'est pas terminé. En effet, le processus de transition ayant été initié en 2000, certaines exploitations se trouvent déjà à un stade avancé du processus de conversion, pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte depuis plus de 10 ans. L'ensemble des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte en 2012-2013 présente donc une variabilité importante et, de ce fait, peut être considéré comme représentatif de la diversité observée à un stade avancé du processus de conversion au goutte-à-goutte. Cette remarque est bien sûr également valable pour l'ensemble des exploitations qui ont préféré maintenir l'irrigation gravitaire en place.

Chapitre 2 - Zone d'étude

La méthodologie développée dans ce travail repose sur l'étude d'un cas concret, le CMV 103 du périmètre irrigué de la plaine des Triffa, au Maroc Oriental. Les résultats chiffrés et les discussions reposent en grande partie sur les spécificités de cette zone d'étude. Ce chapitre a donc pour objet de présenter brièvement ce périmètre d'un point de vue physique et institutionnel. En particulier, les pratiques d'irrigation, à différents niveaux, seront expliquées.

Après une présentation générale de la zone d'étude, la question de l'apport d'eau d'irrigation vers le périmètre irrigué sera abordée. La distribution d'eau au sein du périmètre et du CMV 103 sera ensuite expliquée puis les pratiques d'irrigation à l'échelle de l'exploitation seront détaillées. Enfin, ces différents aspects seront intégrés pour faire le point sur la disponibilité en eau d'irrigation dans ce périmètre irrigué.

2.1 - Présentation générale

Le CMV103 est une division administrative composée des secteurs hydrauliques 22 et 23 du périmètre irrigué de la plaine des Triffa, dont les coordonnées géographiques sont 34°57' de latitude nord et 2°22' de longitude ouest. Ce périmètre irrigué fait partie d'un complexe d'infrastructures hydrauliques développées à partir de la fin des années 1960 à l'aval du bassin versant de l'oued Moulouya, le quatrième plus long fleuve du Maroc et celui ayant le plus grand bassin versant. Son embouchure se trouve à l'extrême nord-est du pays. L'objectif principal de ce complexe est de garantir une alimentation en eau d'irrigation qui permette l'agriculture intensive dans les plaines se trouvant de part et d'autre de cet oued, à proximité de son embouchure.

Ce complexe est d'abord composé de deux barrages en série situés sur l'oued Moulouya, à une soixantaine de kilomètres à vol d'oiseau de son embouchure, dans les monts Bni Snassens. Ce double barrage a une double utilité. D'une part, il permet de stocker un certain volume d'eau, ce qui permet de maitriser la distribution des apports d'eau, naturellement très variables d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre. D'autre part, il permet de remonter physiquement le niveau d'eau bien au-delà de son niveau naturel et ainsi d'alimenter, *via* un réseau de canaux, les périmètres irrigués qui se trouvent à une altitude supérieure à celle de l'oued par voie gravitaire. Ces barrages sont également utilisés pour produire de l'hydroélectricité et pour alimenter en eau potable les villes et les villages alentours.

De ces barrages part donc un réseau de canaux qui alimentent, par voie gravitaire, plusieurs périmètres irrigués situés de part et d'autre de l'oued Moulouya. Le périmètre de la plaine des Triffa est le plus grand de ces périmètres et est le seul situé sur la rive droite. Un canal long d'environ 70 kilomètres est utilisé pour amener l'eau depuis le barrage jusqu'à ce périmètre. De ce canal principal part une série de canaux secondaires, chaque canal secondaire définissant un secteur hydraulique distinct. Ces canaux secondaires alimentent à leur tour des canaux tertiaires qui permettent de desservir chaque exploitation du périmètre irrigué. Le CMV 103, objet de la présente étude, est une division administrative couvrant environ 4000 ha qui comprend les secteurs hydrauliques 22 et 23 de ce périmètre (figure 2).

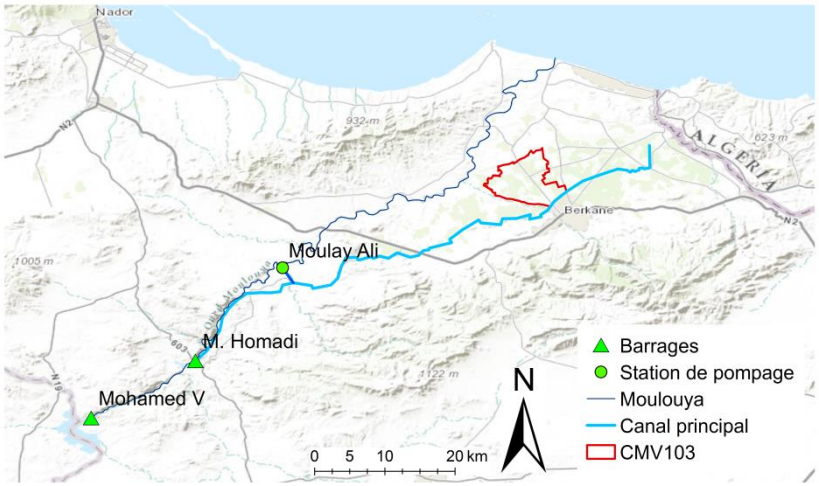


Figure 2 : Présentation générale de la zone d'étude (les coordonnées du Centre de Mise en Valeur, situé au milieu du CMV103, sont 34°57'N et 2°22'O).

La plaine des Triffa, d'une altitude moyenne de 75 m, est délimitée au sud par les monts Bni Snassens, qui culminent à 1535 m, à l'ouest par l'oued Moulouya, à l'est par l'oued Kiss, qui délimite également la frontière entre le Maroc et l'Algérie, et au nord par les collines d'Ouled Mansour. Il s'agit d'une dépression remplie de sédiments quaternaires à perméabilité très variable qui constituent des terrains aquifères. Cette couche s'appuie sur des marnes pliocènes qui constituent le plancher imperméable de la nappe. Sous cette couche imperméable se trouvent des marnes néogènes. Elles reposent sur une couche de calcaires et dolomies karstiques datant du Jurassique qui remonte au sud de la plaine et constitue le flanc nord des Bni Snassens. Sous cette couche se trouvent des schistes primaires (figure 3).

Sous le premier aquifère constitué des sédiments quaternaires, les karsts jurassiques constituent donc un aquifère profond dans lequel se trouve une nappe artésienne alimentée depuis les Bni Snassens. Les marnes, marquant la limite entre les deux aquifères, sont entrecoupées de failles et les deux aquifères pourraient donc être localement connectés (Mortier 1958; Khattach et al. 2004; Boughriba et al. 2006).

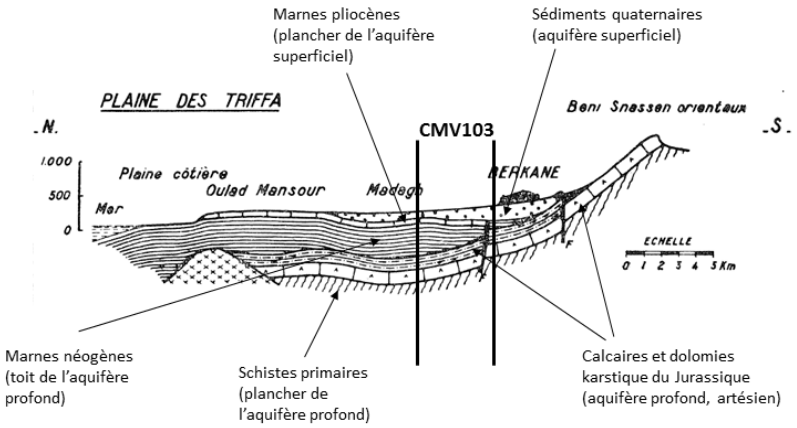


Figure 3 : Coupe géologique schématique nord (à gauche) – sud (à droite) de la plaine des Triffa (adaptée de Mortier 1958). La position du CMV103 est approximative.

Historiquement, la plaine des Triffa était couverte d'une steppe et sa dépression centrale était marécageuse. En 1933, l'assèchement de ces marécages permit le déploiement progressif de l'agriculture irriguée, qui couvre 2000 ha en 1942 puis 9000 ha en 1955 (Mortier 1958). Le développement des grandes infrastructures hydrauliques qui a suivi l'indépendance du Maroc en 1955 a permis d'élever ce chiffre à environ 40000 ha irrigables aujourd'hui.

Les sols de la plaine sont en effet réputés très fertiles en raison d'une texture équilibrée, d'une acidité optimale et d'un drainage favorable (Bendra et al. 2012). La cartographie des sols au sein de la plaine est toutefois complexe et controversée, plusieurs classifications différentes, accompagnées de leurs cartographies respectives, coexistant. L'irrigation intensive pratiquée depuis plusieurs décennies entraine par ailleurs une modification rapide des propriétés pédologiques qui rend délicate l'utilisation de travaux plus anciens.

Au sein du CMV 103, deux grands types de sol seraient rencontrés (figure 4). Dans le cadre de la classification d'Aubert, largement utilisée au Maroc, il s'agit de sols squelettiques peu profonds et des sols steppiques bruns ou châtains, aussi appelés sols isohumiques (Ruellan 1971). Leur texture, de type sablo-limoneuse en surface, passe à argilo-limoneuse en profondeur. Ces sols sont généralement calcaires et cette teneur en calcaire augmente avec la profondeur (Bendra et al. 2012), où des horizons Bca et Ca sont observés dans la quasi-totalité des profils. Dans ces horizons, le calcaire peut

être distribué de manière diffuse, concentré en petits amas ou extrêmement concentré, se présentant alors sous forme de croute, voire de dalle (Mathieu 1981).

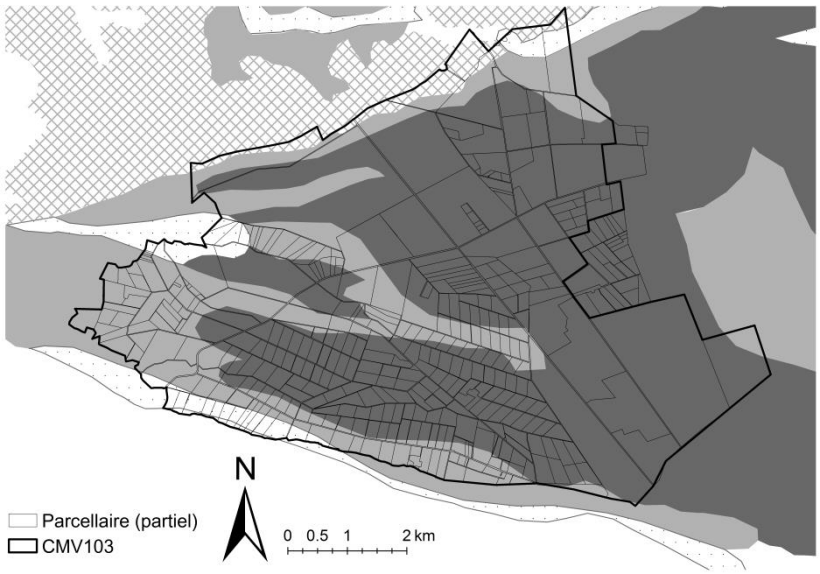
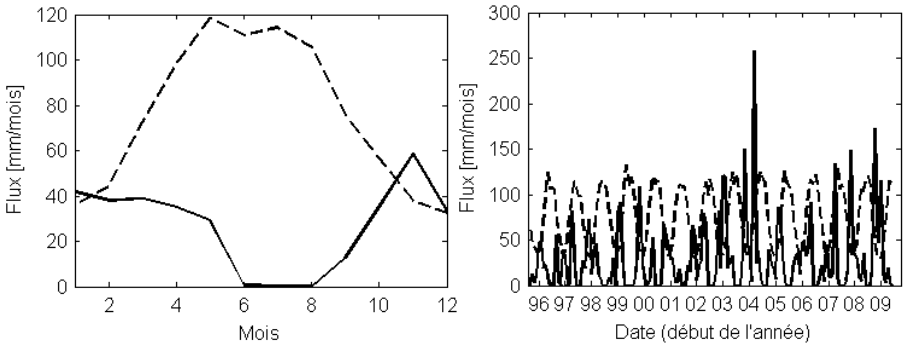


Figure 4 : Pédologie de la zone d'étude. Les zones gris foncé représentent les sols steppiques bruns ou châtains, les zones gris clair représentent les sols squelettiques peu profonds, les zones blanches pointillées représentent les autres classes de sol et les zones hachurées représentent les sols non-classés (collines).

Plusieurs cultures sont pratiquées sur ces sols, majoritairement irriguées. La culture la plus pratiquée est la culture d'agrumes, essentiellement des clémentines et des oranges navels ; dans le CMV 103, cette culture représente 70% des superficies cultivées. Suivent les cultures de pommes de terre et de betteraves, les cultures de céréales, d'autres cultures arboricoles (nèfles…) et quelques cultures maraichères (fèves, tomates…). La majeure partie des agrumes sont destinés à l'exportation, les betteraves à l'industrie sucrière de la région et les pommes de terre, les nèfles et les cultures maraichères sont généralement vendues au souk, le marché local, tandis que les céréales sont souvent destinées à la consommation domestique de l'agriculteur et de sa famille.

Cette région a un climat semi-aride, avec un rapport pluie-évapotranspiration potentielle de 0.23 (FAO 1992). Les températures moyennes vont de 11°C durant les mois d'hiver à 25°C pendant les mois

d'été à la station de Slimania, gérée par l'ORMVAM. Les précipitations sont quant à elles à peu près inexistantes en été mais peuvent atteindre des valeurs élevées en hiver (figure 5a). Outre cette variabilité intra-annuelle, la variabilité interannuelle est également très importante. La pluviométrie annuelle moyenne pour la période 1995 – 2009 est ainsi de 329 mm mais varie de 155 à 544 mm (figure 5b). Ces températures clémentes et l'absence de période de gel fort ou prolongé sont très favorables à l'agriculture.
L'évapotranspiration de référence moyenne est de 1340 mm/an pour la période 1995-2009 à la station de Slimania et varie très peu d'une année à l'autre. Cette valeur doit être corrigée pour obtenir l'évapotranspiration réelle des cultures, qui vaut alors 896 mm/an (résultats de la méthodologie implémentée à la section 3.3 de ce document). La pluviométrie est donc nettement insuffisante pour couvrir cette demande en eau (figure 5a). Le développement de l'irrigation fut donc nécessaire pour garantir un apport d'eau suffisant au développement de l'agriculture intensive.



(a) (b)

Figure 5 : Précipitations (trait plein) et évapotranspiration potentielle ETc (trait pointillé) mensuelles moyennes (a) et mensuelles (b) entre septembre 1995 et juin 2009 (précipitations mesurées à la station météo de Slimania (données ORMVAM) et évapotranspiration potentielle calculée à partir des mesures de température de cette station (voir section 3.3)).

Sur le plan socio-économique, le CMV 103 de la plaine des Triffa a une superficie irriguée depuis le barrage (Grande Hydraulique) de l'ordre de 4000 ha exploités par 750 agriculteurs. La taille moyenne des exploitations tourne donc aux alentours de 5 ha mais présente une variabilité très importante, les plus petites exploitations ne dépassant pas les 10 ares tandis que la plus grande exploite 400 ha. La majeure partie des exploitants sont

propriétaires de leur terre (65% de la surface cultivée pour l'ensemble du périmètre irrigué), tandis que 17% de la superficie est exploitée par des sociétés privées, les 17% restant étant constitués de terres appartenant à l'état et exploitées par des sociétés publiques. Parmi les exploitants recensés comme propriétaires, la stabilité foncière est cependant très variable, certains exploitants étant réellement propriétaires tandis que d'autres, héritiers de la ferme familiale, sont confrontés à des conflits de succession avec d'autres ayant-droits qui rendent leur situation très instable. Enfin, il est important de mentionner que bon nombre d'agriculteurs bénéficient de revenus non-issus de leur activité agricole, qui peuvent venir d'un emploi en dehors de l'exploitation, d'un membre de la famille qui envoie régulièrement de l'argent, etc.

Par rapport aux autres CMV, le CMV 103 présente plusieurs particularités. Il est par exemple beaucoup plus grand que la moyenne et il présente une diversité socio-économique beaucoup plus importante. Sur le plan agricole, la proportion de cultures d'agrumes y est beaucoup plus élevée que dans le reste de la plaine. Enfin, il est situé assez loin de la mer et est au pied des monts Bni Snassens, principale source d'alimentation en eau de la nappe d'eau souterraine de la plaine. L'eau de cette nappe y est donc beaucoup moins salée qu'à d'autres endroits de la plaine et son utilisation, pour l'irrigation ou pour la consommation domestique, s'en trouve grandement facilitée. Pour toutes ces raisons, les pratiques observées au sein de ce CMV ne peuvent donc pas être considérées comme représentatives des pratiques agricoles de l'ensemble du périmètre irrigué.

2.2 - Gestion de l'irrigation

Le cadre institutionnel marocain relatif à la gestion de l'eau implique de nombreux acteurs, actifs à différents niveaux. Au niveau national, plusieurs ministères sont impliqués dans cette gestion, notamment le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime et le Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement (MEMEE 2012), responsables de la planification et des grandes décisions structurelles. La gestion intégrée des principales ressources en eau douce (principalement l'eau fluviale et souterraine) est organisée par grands bassins hydrauliques. Le Maroc est divisé en 9 grands bassins hydrauliques au sein desquels la gestion de l'eau est du ressort des Agences de Bassin Hydraulique (ABH) ; ces agences dépendent du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement. Par ailleurs, le Maroc est également divisé en « régions » agricoles, chaque « région » étant encadrée par un Office Régionale de Mise en Valeur Agricole (ORMVA) ; ces ORMVA dépendent quant à eux du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime. La gestion de l'eau agricole est dévolue à ces ORMVA mais de nombreuses associations d'usagers existent également et les usagers privés ont par ailleurs, à titre individuel, un certain nombre de droits relatifs à l'utilisation de l'eau. Enfin, la production d'énergie hydro-électrique et d'eau potable ainsi que l'utilisation d'eau à des fins industrielles est du ressort de l'Office National de l'Electricité et de l'Eau potable (ONEE depuis 2012, anciennement scindé en Office National de l'Electricité ONE et Office national de l'Eau Potable ONEP (ONEE 2016)) ainsi que d'une myriade de petits acteurs, concessionnaires privés, communes, etc. (en ce qui concerne l'alimentation en eau potable principalement) (MEMEE 2012).

Prélèvement d'eau

L'eau d'irrigation appliquée au sein de la zone d'étude provient de deux sources principales : le complexe de barrages situé sur l'oued Moulouya et la nappe d'eau souterraine se trouvant sous la plaine des Triffa. Ces deux réservoirs sont gérés par l'agence gouvernementale spécialement dédiée à cette gestion, l'Agence de Bassin Hydraulique de la Moulouya (ABHM).

Le complexe de barrages est composé de deux barrages en série distants d'une quinzaine de kilomètres. Le réservoir amont, derrière le barrage Mohamed V, avait à l'origine une capacité de stockage d'environ 700 hm³ mais sa capacité n'est plus aujourd'hui que d'environ 250 hm³ à cause des

sédiments qui emplissent peu à peu le réservoir. Le réservoir aval, derrière le barrage Mechra Homadi, a une capacité de stockage de 10 hm³. Le barrage Mohamed V sert essentiellement à stocker l'eau et à produire de l'hydroélectricité. La totalité du débit sortant de ce barrage est en effet turbinée puis acheminée vers le barrage Mechra Homadi par le lit naturel de l'oued. Le barrage Mechra Homadi sert quant à lui principalement à relever le niveau de l'eau et à répartir cette eau entre les différents utilisateurs : sur la rive droite, le périmètre irrigué de la plaine des Triffa et la station de potabilisation qui alimente la ville d'Oujda et, sur la rive gauche, plusieurs périmètres irrigués (Zebra, Bou Areg et Garet) et divers villages. Enfin, un très faible débit réservé reprend le cours naturel de la Moulouya.

L'eau de ce barrage est acheminée vers le périmètre de la plaine des Triffa par un canal gravitaire dont le débit maximal potentiel est d'environ 11 m³/s. Beaucoup plus en aval, la station de pompage Moulay Ali (figure 2) permet de pomper de l'eau dans l'oued Moulouya et de la réinjecter dans ce canal. L'objectif déclaré de cette station de pompage est de permettre la récupération de l'eau des sources alimentant la Moulouya entre le barrage et la station de pompage. A notre connaissance, cette station de pompage, dont la gestion dépend de l'office de gestion du périmètre irrigué (ORMVA-Moulouya), n'a cependant jamais été utilisée.

La gestion de l'ABHM repose sur l'utilisation d'un logiciel de gestion de l'eau qui intègre les demandes des différents utilisateurs et leur ordre de priorité (la demande en eau domestique est prioritaire sur la demande en eau d'irrigation), la disponibilité en eau dans les réservoirs et les prévisions d'apport naturels. Sur cette base, un planning de distribution prévisionnel est réalisé chaque année. La distribution prévue dans ce planning est ajustée en cours d'année en fonction des apports réels dans le barrage et de l'évolution du stock.

En pratique, la demande maximale, en période estivale, est de l'ordre de 20 m³/s, ce qui correspond exactement au débit moyen de la Moulouya pour la période 1957-1988. Ce débit moyen est toutefois très variable d'une année à l'autre, avec des minima de l'ordre de 3.5 m³/s et des maxima approchant les 75 m³/s (données : Vörösmarty et al. 1998). La variabilité est également très forte d'un mois à l'autre, avec des débits moyens mensuels atteignant les 40 m³/s au début du printemps mais ne dépassant pas les 4 m³/s au mois d'aout.

Considérant que la demande est maximale de début juillet à fin septembre, la demande pour ces trois mois représente 160 hm³. Durant cette même période, 48 hm³ entrent en moyenne dans le barrage. La différence, 112 hm³,

représente le volume net à fournir durant ces trois mois. Cela représente la moitié du volume maximal disponible, en moyenne. En ajoutant à cette réflexion le fait que la demande au mois d'octobre est également plus élevée que les apports, on comprend aisément que la gestion du barrage est compliquée et délicate et que la capacité de stockage actuelle ne permet pas de satisfaire la demande dès le moment où les apports sont inférieurs à la moyenne. Si l'objectif de répartition intra-annuelle des apports d'eau peut donc être rempli lors d'une année « normale », la capacité de stockage actuelle ne permet désormais donc plus de répondre à l'objectif de répartition interannuelle des apports d'eau. Les données de l'ORMVA-Moulouya confirment cette analyse, avec des apports d'eau d'irrigation depuis le barrage inférieurs à la demande nette en eau d'irrigation deux mois sur trois (66.3%) pour le CMV103 durant la période 1995-2009. La résistance à la sécheresse des quatre périmètres irrigués est donc de ce point de vue très limitée.

Devant cette réalité, les agriculteurs de la zone d'étude se tournent donc naturellement vers la nappe d'eau souterraine pour compléter ces apports d'eau régulièrement insuffisants. Le droit de l'eau du Maroc leur permet en effet d'exploiter cette nappe en toute légalité. Extrêmement complexe et hérité d'usages traditionnels, parfois lié à la propriété foncière, le droit de l'eau marocain permet en pratique aux agriculteurs d'utiliser l'eau qui jouxte leur propriété (Plusquellec and Bachri 2013), par extension l'eau souterraine accessible depuis la surface de leur propriété. Aucune déclaration n'est requise et le suivi, le contrôle ou la gestion de ces prélèvements sont donc extrêmement compliqués.

Sur cette base, l'immense majorité des agriculteurs de la zone d'étude disposent donc d'un accès à la nappe, soit un puits lorsque la profondeur est limitée à quelques dizaines de mètres soit un forage, dont la profondeur peut atteindre une centaine de mètres. L'eau de la nappe y est alors pompée à l'aide d'une pompe à moteur et utilisée pour irriguer les parcelles cultivées. Lorsque la qualité de l'eau le permet, l'irrigation peut se faire avec de l'eau provenant uniquement de la nappe. Quand la salinité de l'eau de la nappe est trop élevée, son eau est mélangée à celle provenant du barrage et l'irrigation est alors réalisée avec ce mélange d'eau de la nappe et d'eau du barrage.

Au niveau du CMV 103, l'eau est d'une qualité particulièrement bonne, quel que soit l'aquifère dans lequel elle est pompée, et peut donc être utilisée comme unique source d'irrigation si nécessaire. Par ailleurs, la profondeur de la nappe phréatique y varie de 10 à 20 m et son pompage est donc

relativement aisé, même avec une pompe standard. L'exploitation de la nappe au sein du CMV 103 est donc facile et très répandue.

Distribution d'eau

L'utilisation de l'eau pompée dans la nappe souterraine est donc du seul ressort de l'agriculteur. Il en va tout autrement de l'eau provenant du barrage. Dès son arrivée au sein du périmètre irrigué de la plaine des Triffa, sa gestion revient à un office gouvernemental responsable de la gestion des périmètres irrigués, l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole – Moulouya (ORMVAM). Cet office est responsable de la gestion du périmètre irrigué dans sa globalité, qu'il s'agisse de la distribution d'eau d'irrigation et de sa facturation mais aussi de la gestion des infrastructures hydrauliques du périmètre, du suivi de l'agriculture dans tous ses aspects (conseils en matière d'irrigation, aspects agronomiques, etc.).

L'eau s'écoulant dans le canal principal est déviée vers un certain nombre de canaux secondaires, chaque canal secondaire alimentant un secteur hydraulique défini. De ces canaux secondaires part une série de canaux tertiaires qui permettent d'alimenter chaque exploitation individuelle. L'alimentation des différentes exploitations est contrôlée manuellement par l'ouverture et la fermeture de vannes permettant un contrôle précis du débit et de la durée d'alimentation des exploitations. La gestion quotidienne des différents secteurs hydrauliques est déléguée à des centres, dépendant directement de l'ORMVAM, qui regroupent quelques secteurs hydrauliques : les Centres de Mise en Valeur (CMV). Ces CMV sont donc responsables de la mise en œuvre concrète des décisions prises par l'ORMVAM, en particulier de l'apport d'eau aux différentes exploitations. La zone d'étude traitée dans le cadre de ce travail correspond à la zone d'action d'un de ces CMV, le CMV 103, qui est responsable de la gestion des secteurs hydrauliques 22 et 23.

Le CMV 103 est responsable de l'alimentation d'environ 4000 ha de cultures irriguées cultivées par 750 agriculteurs. 9 personnes travaillent quotidiennement à cette gestion : 1 responsable, 2 vulgarisateurs, 1 agent d'encadrement et 5 aiguadiers. Pour faciliter la gestion quotidienne, ce CMV est divisé en 5 sous-secteurs hydrauliques de taille comparable : les secteurs 22T1, 22T2, 22T3, 23T et 23BA.

Le processus de décision qui permet de déterminer les volumes précis alloués aux différents agriculteurs est complexe et repose sur différentes règles, variablement explicites. Des prévisions annuelles sont tout d'abord réalisées au mois de septembre ; elles déterminent les volumes auxquels

chaque exploitation peut prétendre pendant l'année à venir. Ces volumes sont ensuite distribués aux agriculteurs au moment où ils en font la demande, en respectant les volumes prévus. Ces prévisions sont évidemment ajustées en fonction de la demande réelle et des apports effectifs d'eau depuis le barrage.

Premièrement, sur base des prévisions d'apports d'eau depuis le barrage réalisées par l'ABHM et des superficies à irriguer recensées par les aiguadiers des différents CMV, l'ORMVAM attribue à l'année à venir un « régime hydrique » auquel sont associées des règles de priorité. Trois régimes sont possibles : le régime non-restrictif (l'eau est alors distribuée sans ordre de priorité particulier), le régime semi-restrictif (la priorité est alors donnée aux cultures arboricoles, puis aux betteraves et enfin aux autres cultures) ou le régime restrictif (l'eau est exclusivement réservée aux cultures arboricoles). La logique qui sous-tend ces priorités est que les cultures arboricoles sont en place pour plusieurs années. Une sous-irrigation ponctuelle peut ainsi avoir des conséquences à long terme et doit donc être évitée. La deuxième position, en terme de priorité, donnée aux betteraves repose sur le fait que la filière betteravière implique le secteur agricole mais aussi les secteurs des transports, de l'industrie sucrière, etc. Une sous-irrigation ponctuelle des betteraves aurait ainsi un impact qui dépasserait largement les frontières du secteur agricole et doit donc, dans la mesure du possible, être évitée. La moindre priorité donnée aux autres cultures s'explique car il s'agit de cultures annuelles dont l'impact économique implique essentiellement les acteurs du secteur agricole. Une sous-irrigation de ces cultures aurait donc des impacts de plus courte durée et qui seraient moindres en termes économiques.

Une fois le régime déterminé, les agriculteurs rendent leurs demandes pour l'année à venir, demandes appuyées par le programme des cultures. S'ensuivent une série de négociations, menées avec des représentants des agriculteurs ou les agriculteurs eux-mêmes, afin de réaliser les prévisions annuelles pour chaque exploitation. Les règles de priorité déterminées précédemment guident les négociations mais ne sont pas contraignantes. Le résultat est exprimé en nombre de « tours d'eau » par an auquel chaque agriculteur a droit. Un tour d'eau, calculé sur base des besoins standards d'une culture d'agrumes irriguée par voie gravitaire, représente un apport d'eau d'une durée de 6h/ha et d'un débit de 30l/s (soit 65 mm d'eau). Le volume de chaque tour d'eau n'est donc pas négocié, seul le nombre de tours pouvant varier d'une année à l'autre. En cours d'année, l'agriculteur a accès à un de ses tours d'eau quand il le souhaite. Une fois la demande réalisée, le

délai de livraison va de quelques heures à une ou deux semaines en fonction de la demande des autres agriculteurs et du débit disponible dans les canaux d'irrigation alimentant son exploitation. En général, entre 6 et 10 tours d'eau par an sont ainsi distribués aux agriculteurs, principalement répartis entre mai et septembre.

Dès l'arrivée au sein de l'exploitation, l'eau est sous la responsabilité de l'agriculteur. Elle lui est alors facturée à un prix avoisinant les 0.35 Dh/m³ (1Dh ≈ 0.1€) une fois par trimestre. A titre de comparaison, une grossière estimation des coûts associés au pompage de l'eau dans la nappe souterraine donne des valeurs de 0.25 Dh/m³ en prenant en compte le prix officiel du gasoil au Maroc, de 0.1 Dh/m³ en prenant en compte le prix approximatif du gasoil de contrebande illégalement importé d'Algérie (seuls les coûts d'essence sont intégrés à ce calcul, ni les couts de forage ni l'achat du matériel ne le sont). Le principal argument utilisé pour justifier l'utilisation de l'eau du barrage est donc la qualité de l'eau, nettement plus douce que celle de la nappe.

Gestion à la parcelle

Au sein de l'exploitation, la gestion de l'eau dépend uniquement de l'agriculteur. Afin d'appliquer l'eau sur l'ensemble de la parcelle, deux grands types de techniques sont pratiqués dans la zone d'étude : l'irrigation gravitaire et l'irrigation goutte-à-goutte. L'irrigation gravitaire consiste à épandre l'eau en la faisant ruisseler à la surface de la parcelle grâce à un réseau de rigoles façonnées à même la terre (figure 6). Le type d'irrigation gravitaire pratiqué dans le CMV103 est généralement l'irrigation en cuvette pour les cultures arboricoles (des cuvettes sont créées autour des arbres et sont tout à tour submergées en amenant l'eau par un canal tracé à même le sol) et l'irrigation par bassins à billons ou à la raie pour les cultures maraichères. L'irrigation goutte-à-goutte consiste à amener l'eau au pied de chaque plante au travers de tuyaux dans lesquels l'eau est sous pression. Ces tuyaux sont équipés de goutteurs qui permettent à l'eau de sortir, goutte par goutte, du tuyau et d'alimenter ainsi chaque plante.

Bien que l'agriculteur soit responsable de son exploitation, l'ORMVAM dispose d'un service de vulgarisation dont l'objectif principal est l'encadrement et l'assistance aux agriculteurs. Le mode de fonctionnement de ce service consiste à effectuer un diagnostic auprès des agriculteurs afin d'identifier leurs besoins en conseils. Une fois ce diagnostic réalisé, le service vulgarisation et l'agriculteur collaborent en vue de prendre les bonnes décisions au bon moment. Ce soutien est généralement ponctuel et

les agriculteurs bénéficiant de ce soutien varient donc dans le temps. Le processus de sélection des agriculteurs bénéficiant de ce soutien et la procédure à suivre pour en bénéficier ne nous ont pas été communiqués.

Irrigation gravitaire

L'irrigation gravitaire requiert donc d'appliquer de grandes quantités d'eau au même moment. L'eau devant ruisseler sur l'entièreté de la parcelle, il est en effet nécessaire d'appliquer des débits importants dans les rigoles afin de limiter les pertes par infiltration. Une fois au pied des plantes, l'eau est immobilisée et s'infiltre alors dans le sol. Cette technique est assez simple et requiert peu d'investissements puisque la seule contrainte, outre un apport d'eau suffisant, est que la parcelle soit adéquatement nivelée, ce qui peut se faire à la main avec une précision acceptable.

L'opération d'irrigation est par contre assez lourde à mettre en place. Elle nécessite en effet une certaine main d'œuvre pour manipuler efficacement les débits d'eau. L'apport d'eau étant continu, il convient de le prendre continuellement en charge. Le processus est donc également assez long, au moins aussi long que la durée de l'apport d'eau. Pour rappel, l'apport d'eau depuis le barrage dure 6 heures par hectare. L'irrigation d'une exploitation de 4 hectares implique donc un travail continu d'au moins 24 heures. Enfin, notons que la gestion de cette technique requiert une certaine expertise. La manipulation de débits trop faibles se traduit en effet par de grosses pertes par infiltration lors du transport et par une faible uniformité d'application sur l'ensemble de la parcelle tandis que l'application d'une trop grande quantité d'eau par plante se traduit par des pertes par drainage. Dans les deux cas, une mauvaise manipulation entraine une surconsommation d'eau d'irrigation. Lors d'épisodes d'irrigation, les exploitants doivent donc ponctuellement faire appel à de la main d'œuvre supplémentaire, qu'il s'agisse de membres de la famille ou d'ouvriers engagés à la journée, pour un salaire de l'ordre de 100 Dh/jour.



Figure 6 : Irrigation gravitaire en cours sur une parcelle de pommes de terre.

L'application d'eau d'irrigation se faisant obligatoirement par gros volumes, le principe consiste à apporter assez d'eau pour reconstituer la réserve en eau utile du sol lors de chaque événement d'irrigation. Les plantes utilisent cette eau et, lorsque la réserve en eau facilement utilisable est épuisée, un nouvel apport d'eau doit être épandu. La réserve en eau utile des sols est en moyenne de 115 mm (résultat de la méthodologie implémentée à la section 3.1 de ce document pour une zone racinaire de 1m de profondeur) et la réserve en eau facilement utilisable par les agrumes représente la moitié de cette réserve (Allen et al. 1998), soit 57 mm. Le tour d'eau d'irrigation du barrage étant de 65 mm, il permet théoriquement de combler le déficit. Compte tenu des pertes par évaporation et infiltration inévitables, il faut toutefois compter avec une efficience théorique maximale de l'ordre de 70% (Tiercelin 2006) et ces 65 mm permettent donc d'apporter 45 mm d'eau sur l'ensemble de la parcelle. En plein été, où les précipitations sont nulles et où l'évapotranspiration moyenne atteint 4 mm par jour, ces 45 mm d'eau représentent la consommation moyenne de la plante pendant 11 jours. Ce type d'irrigation doit donc être pratiqué une fois tous les 10 jours au plus fort de la saison sèche, à des intervalles plus espacés avant et après cette période.

Irrigation goutte-à-goutte

L'application d'eau par la technique du goutte-à-goutte est radicalement différente. A partir d'un système constitué, au minimum, d'une pompe, d'un réseau de tuyaux et de goutteurs fixés à ces tuyaux et disposés au pied des plantes, elle permet d'appliquer de toutes petites quantités d'eau très localement, ce qui crée un « bulbe d'humectation » au sein duquel l'eau est disponible pour la plante. L'application d'eau se fait alors tous les jours dans de petites quantités afin de maintenir une teneur en eau suffisante au sein du bulbe. Les pertes par évaporation sont très réduites puisque seule une petite partie de la surface de la parcelle est mouillée et les pertes par drainage peuvent être limitées si le dosage est calculé avec précision.

L'opération d'application en tant que telle est extrêmement facile et rapide à réaliser. Une fois le système installé, il suffit juste de le mettre en marche, les quantités appliquées étant fonction de la durée d'activité du système. Les coûts de mise en place sont par contre très importants. Comme expliqué précédemment, les apports d'eau du barrage sont réalisés en une fois et un important volume d'eau doit donc être pris en charge (6h par hectares pour un débit de 30 l/s représentent 648 m³, soit près de 2600 m³ pour une exploitation de 4 ha). Avec la technique du goutte-à-goutte, l'eau est appliquée en petite quantité tous les jours et elle doit donc être provisoirement stockée. Outre le système d'application en tant que tel (pompe, tuyaux, goutteurs), un important espace de stockage d'eau doit donc être disponible, le plus souvent un bassin imperméable creusé dans le sol et dans lequel l'eau sera pompée. La construction d'un tel espace représente un coût important, aussi bien du point de vue financier que de l'espace occupé.

Un autre avantage de cette technique d'application est qu'elle permet de pratiquer la fertigation, c'est-à-dire l'apport d'engrais, dilués dans l'eau d'irrigation, en même temps que l'irrigation. En plus d'un espace de stockage, d'une pompe, d'un réseau de tuyaux et de goutteurs, l'équipement nécessaire compte donc aussi des filtres, des dispositifs permettant l'ajout d'engrais, le contrôle de l'acidité et de la salinité, des espaces de stockage des engrais et des acides, etc. La mise en place d'un système d'irrigation goutte-à-goutte complet a donc un coût très variable dont l'ordre de grandeur varie de 10 000 à 50 000 Dh/ha.

Une fois installé, le système demande un certain entretien. Les goutteurs, en particulier, doivent être régulièrement entretenus ou remplacés. Leur faible diamètre les rend en effet très sensibles à la qualité de l'eau et, en présence d'une eau chargée, ils se bouchent très rapidement malgré la présence de

filtres dans le système. Les agriculteurs équipés en goutte-à-goutte sont dès lors très attentifs à la qualité de l'eau et cette attention permet d'allonger la durée de vie des goutteurs.

La mise en place d'un tel système requiert donc d'importants investissements de départ et un certain entretien mais, avec une efficience d'utilisation de l'eau théorique maximale de l'ordre de 90%, il pourrait permettre des économies d'eau substantielles. Pour atteindre de telles efficiences, la gestion du système doit par contre être très précise et implique un suivi fin et régulier de la demande en eau des cultures. Un tel suivi est idéalement réalisé en combinant deux approches. Tout d'abord, la demande en eau de la plante doit être calculée chaque jour afin de combler cette demande. Le volume de sol irrigué étant très faible, sa réserve est en effet quasi nulle et l'apport doit avoir lieu quotidiennement. Afin de quantifier la demande en eau de la plante, une méthode assez pratique consiste à l'estimer sur base des conditions météorologiques. La présence d'une station météorologique complète suivie quotidiennement à proximité de la parcelle est donc recommandée. Ensuite, cette mesure étant approximative, il convient de vérifier régulièrement la teneur en eau effective au sein du bulbe d'humectation afin de corriger les approximations inhérentes au calcul de demande en eau de la plante. Pour ce faire, un réseau d'appareils de mesure répartis sur plusieurs bulbes est nécessaire. Grâce à ces appareils, une mesure régulière de la succion permet de calculer la teneur en eau et de l'ajuster si nécessaire.

L'utilisation d'un tel système d'irrigation est donc assez technique et requiert une grande rigueur. L'apport d'eau étant très local et devant être réalisé pour chaque plante, il convient assez bien aux cultures arboricoles ou aux cultures ayant une densité de semis relativement faible, comme les pommes de terre. Il n'est par contre pas adapté à des cultures couvrant l'ensemble de la parcelle où les plantes ne peuvent être irriguées individuellement, comme les céréales. Il implique un investissement initial assez important mais est ensuite très facile à utiliser au quotidien. Lorsqu'il est bien géré, il permet en outre théoriquement de réaliser des économies d'eau substantielles, à la fois grâce à une efficience d'application très élevée et grâce à une réduction des surfaces mouillées qui diminue significativement les pertes par évaporation.

Soutien à l'irrigation goutte-à-goutte

Dans le cadre du plan *Maroc Vert* et de son *Programme National d'Economie d'Eau d'Irrigation* (PNEEI), le gouvernement marocain a pour

objectif de réduire les pertes d'eau agricole de 20 à 50% tout en augmentant sa productivité de 10 à 100% (Maatougoui 2014). En raison du potentiel de réduction de la consommation d'eau associé à la technologie goutte-à-goutte, une des mesures phares du PNEEI est donc de promouvoir la conversion des exploitations à cette technologie.

La principale mesure prise par le gouvernement pour encourager cette conversion est le versement de subsides ponctuels aux agriculteurs lors de la conversion. Concrètement, lorsqu'un agriculteur fait l'acquisition d'un système d'irrigation goutte-à-goutte, ce subside couvre aujourd'hui 80% des frais de conversion (ce chiffre a d'abord été de 40% puis est passé à 60% avant d'atteindre sa valeur actuelle), les 20% restant étant à charge de l'agriculteur. Le subside couvre par ailleurs l'ensemble des frais : pompe, filtres, canalisations, réalisation du bassin de stockage, mais aussi étude de dimensionnement du système réalisé par un bureau d'étude, obligatoire pour pouvoir bénéficier du subside. Dans certains cas, ce subside peut monter à 100% des frais de conversion pour les plus petits agriculteurs.

Du point de vue de l'agriculteur, le montant à investir au départ est un des principaux freins à la conversion au goutte-à-goutte. L'existence d'un tel subside est donc déterminante dans le choix des agriculteurs chez qui cette solution est pratiquement réalisable. Un certain nombre de freins non financiers existent en effet, comme le manque de place pour la construction du bassin de stockage ou l'absence de stabilité du statut foncier. Cette politique fut donc particulièrement efficace puisque, alors qu'aucune exploitation ne pratiquait le goutte-à-goutte en l'an 2000, année d'entrée en vigueur du subside, près de 25% de la superficie irriguée l'était par la technologie goutte-à-goutte en 2009 et ce chiffre montait à plus de 30% en 2012 (l'objectif déclaré par l'ORMVAM est d'atteindre 80%). Il est utile de préciser que ces chiffres sont basés sur les demandes de subsides transmises à l'ORMVAM. Suivant l'exemple de leurs voisins, un certain nombre d'agriculteurs ont adopté la technologie goutte-à-goutte mais n'ont pas demandé le subside gouvernemental. Dans ce cas, le système adopté est généralement un système bon marché, sans filtre, sans espace de stockage de l'eau ni de dimensionnement officiellement réalisé. L'eau est alors pompée directement dans la nappe. La superficie effectivement irriguée au goutte-à-goutte doit donc être supérieure aux chiffres officiels ici mentionnés.

Besoins en eau

Afin de mesurer l'ampleur du problème d'utilisation d'eau dans la zone d'étude, il convient maintenant de faire le point sur les besoins et la

disponibilité de cette ressource. Au sein de la zone d'étude, l'évapotranspiration des cultures est en moyenne de 896 mm/an et la pluviométrie moyenne est de 329 mm/an (voir plus haut). L'ensemble des superficies effectivement irriguées depuis le barrage Mohamed V dans la plaine des Triffa représente environ 36000 ha (ORMVAM 2006). Sur la rive gauche de la Moulouya, la plaine du Zebra représente 5600 ha, celle de Bou-Areg 10000 ha et celle de Garet 13500 ha (ORMVAM 2006). Au total, le réservoir Mohamed V alimente donc 65000 ha en eau d'irrigation. Pour cette superficie, la demande moyenne nette en eau d'irrigation atteint donc 369 hm^3/an.

L'efficience de transport de l'eau du barrage à la parcelle est estimée par l'ORMVAM à 78%. L'efficience maximale de l'application, en irrigation gravitaire, est de 70%. Pour répondre à cette demande, un minimum de 676 hm^3 devrait être prélevé chaque année dans le barrage si toutes les superficies étaient irriguées par voie gravitaire. Avec l'irrigation goutte-à-goutte, dont l'efficience maximale est de 90%, ce chiffre descend à 526 hm^3. L'économie potentielle est donc de 150 hm^3/an, soit plus de la moitié de la capacité du réservoir Mohamed V. Ce chiffre explique à lui seul l'enthousiasme des gestionnaires pour la technologie goutte-à-goutte.

Le débit à l'entrée du réservoir varie de 3.5 à 75 m^3/s pour une moyenne de 20 m^3/s. Cela représente des apports allant de 110 à 2365 hm^3/an pour une moyenne de 631 hm^3/an. La demande annuelle en eau potable est de l'ordre de 63 hm^3. Sur une base annuelle et sans garder de débit dans le cours naturel de la Moulouya, les apports moyens permettraient donc tout juste de couvrir les besoins minimums si l'ensemble des superficies étaient irriguées au goutte-à-goutte. Avec une réserve utile estimée à 200 hm^3, les apports annuels minimums pour couvrir les besoins sont de 10.3 m^3/s si les superficies sont irriguées au goutte-à-goutte et de 15.1 m^3/s si les superficies sont irriguées par voie gravitaire. Ces chiffres correspondent respectivement au 26ème centile et au 43ème centile de l'historique de débit pour la période 1957-1988. Cela signifie que, même dans la configuration la plus optimiste (pas de dynamique annuelle, réservoir plein en début d'année et vide en fin d'année et efficience d'irrigation théoriquement maximale), l'apport d'eau du barrage ne couvre les besoins que 74 années sur 100 si l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée et 57 années sur 100 si l'irrigation gravitaire est pratiquée. Que les apports d'eau soient déficitaires une année sur deux ou une année sur quatre change peu pour les agriculteurs, qui doivent donc se tourner vers l'exploitation des ressources en eau souterraines pour s'assurer une récolte viable.

Bien que les apports naturels soient théoriquement suffisants pour couvrir la majeure partie des besoins en eau pour l'irrigation, la capacité actuelle du réservoir Mohamed V ne permet donc plus de répondre à cette demande. La prise en compte de conditions réalistes aggrave encore ce constat. La majeure partie des apports a lieu en hiver et au printemps alors que la demande est maximale en été. Le stock d'eau doit donc systématiquement être utilisé à cette période et n'est donc plus disponible en cas de retard de la saison humide. Si l'hypothèse d'un réservoir plein en début de saison sèche semble *a priori* réaliste, une succession d'années sèches, comme durant la période 1983-1985, trois années successives durant lesquelles les apports d'eau n'atteignent pas 200 hm^3/an, pourrait mettre à mal cette hypothèse. Par ailleurs, vider le réservoir en fin de saison lui enlève toute utilité quant à ses fonctions de répartition interannuelle de l'eau d'irrigation et de production d'hydroélectricité et n'est donc pas non plus une hypothèse réaliste. Enfin, l'utilisation de valeurs d'efficience de 70 ou 90% selon le type d'irrigation relève là-aussi de l'excès d'optimisme et les valeurs de demande en eau sont donc sous-estimées.

La capacité du barrage est donc aujourd'hui nettement insuffisante pour répondre à la demande. Cette insuffisance se répercute donc sur la nappe d'eau souterraine, que les agriculteurs utilisent comme substitut lorsque les apports depuis le barrage viennent à manquer. L'ensemble des ressources en eau de la région est donc sous pression, ce qui explique l'intérêt croissant porté aux questions relatives à l'utilisation de l'eau dans la zone d'étude.

2.3 – Acquisition des données

Afin de remplir les objectifs présentés, un certain nombre de données seront nécessaires. La question des données est récurrente dans le domaine de l'irrigation (le traitement réservé à cette question est abordé en détail au chapitre 5). Il est donc ici opportun de faire le point sur les données qui seront utilisées dans le cadre de ce travail, leur méthode d'acquisition et les premières conclusions qui peuvent être tirées de leur observation.

Les données collectées peuvent être réparties en deux grandes catégories. La première catégorie concerne les données disponibles pour l'ensemble de la zone d'étude, qu'il s'agisse de données globales pour le CMV103 (climat, sol, débits dans les canaux d'irrigation…) ou de données disponibles pour chaque exploitation du CMV103 (cultures, superficies…). La seconde catégorie comprend un ensemble des données non-disponibles auprès des administrations et qui furent donc collectées pour certaines exploitations, considérant ces exploitations comme représentatives de l'ensemble des exploitations de la zone d'étude.

Données disponibles pour l'ensemble de la zone d'étude

Les données disponibles pour l'ensemble de la zone d'étude furent obtenues auprès des administrations dépositaires de ces données, principalement l'ABHM, l'ORMVAM, l'Université Mohammed Premier d'Oujda (UMP) et l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II de Rabat (IAV). Des conventions de collaboration entre ces divers organismes et l'Université catholique de Louvain (UCL) ont facilité les échanges entre ces institutions. Ces données sont synthétisées au tableau 1.

Météorologie

Les données météorologiques utilisées sont les températures et les précipitations. Elles proviennent de l'ORMVAM. Les données de températures sont les températures minimales et maximales mesurées à la station expérimentale de Slimania (CMV103). Elles sont disponibles au pas de temps quotidien pour la période allant du 1er septembre 1995 au 31 avril 2013 (figure 7).

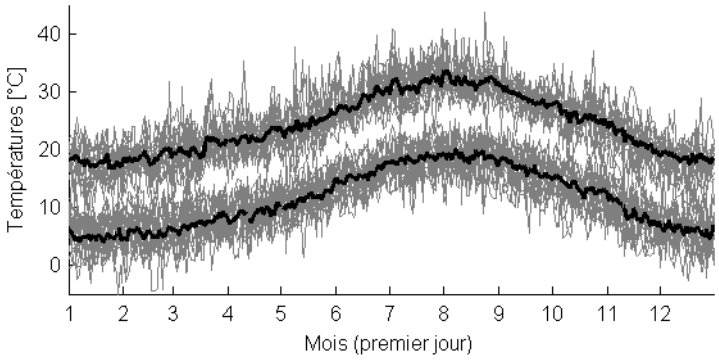


Figure 7 : Températures quotidiennes maximales (en gris en haut) et minimales (en gris en bas) mesurées à la station Slimania (CMV103) pour les années 1996 à 2011. Les lignes noires représentent les températures maximales (en haut) et minimales (en bas) quotidiennes moyennes (données : ORMVAM).

Les températures sont maximales en été et varient généralement entre 30 et 40°C selon les années (le maximum absolu est de 44.8°C et fut mesuré le 2 aout 2012, le jour en moyenne le plus chaud de l'année est le 3 aout et la température maximale moyenne y est de 33.7°C). Elles sont minimales en hiver et descendent rarement sous les 0°C (le minimum absolu est de -5°C et fut mesuré le 29 janvier 2005, le jour en moyenne le plus froid de l'année est le 21 janvier et la température minimale moyenne y est de 4°C). Le cycle saisonnier est très marqué, aussi bien pour les températures maximales que minimales (figure 7).

Les données de pluviométrie sont mesurées au pluviomètre du CMV103. Elles sont disponibles au pas de temps journalier du 1er septembre 1992 au 30 aout 2005 et au pas de temps mensuel jusqu'au mois d'octobre 2009.

Les précipitations sont très variables, aussi bien d'un mois à l'autre que d'une année à l'autre (figure 8). Les précipitations annuelles s'élèvent à 329 mm en moyenne mais varient de 168.4 mm (en 1998) à 516.6 mm (en 2003). Les valeurs mensuelles moyennes vont quant à elles de moins de 1 mm en juin, juillet et aout à près de 60 mm en novembre. Des pics proches de 200 mm/mois peuvent même être observés, comme en mars 2004 (231 mm) ou en octobre 2008 (194.3 mm).

Tableau 1 : Principales données utilisées dans ce document et disponibles pour l'ensemble de la zone d'étude.

	Source/ Propriétaire	Spatialisation	Temporalité
Météorologie			
Précipitations	ORMVAM	station Slimania	Mensuelle 1995-2009
Précipitations	ORMVAM	station Slimania	Quotidienne 1992-2004
Températures (min et max)	ORMVAM	station Slimania	Quotidienne 1995-2012
Pédologie			
Carte des sols	UCL	Triffa Nord	Inconnue
Analyses (granulométrie et carbone)	De Chevron-Villette	25 profils	1956
Piézométrie			
Cartes piézométriques	ABHM	Courbes de niveau (10 m)	1976, 1992, 1995
Suivi piézométrique	ABHM	1 piézomètre (CMV103)	Bimestrielle 1971-1999
Suivi piézométrique	ABHM	30 piézomètres (Triffa)	Bimestrielle 1971 - date variable (jusque 2015 pour 4 d'entre eux)
Agronomie			
Cultures	ORMVAM	Par exploitation	2009
Superficies	ORMVAM	Par exploitation	2009
Irrigation (technologie)	ORMVAM	Par exploitation	Annuelle 1995-2009
Débits			
Irrigation	ORMVAM	CMV103	Mensuelle 1995-2014

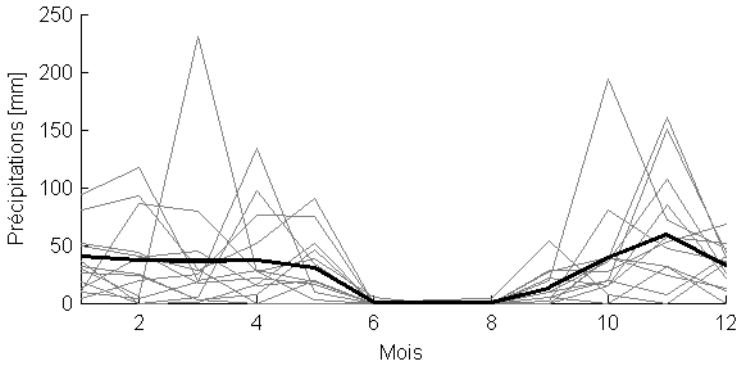


Figure 8 : Précipitations mensuelles mesurées au pluviomètre du CMV103 pour les années 1996 à 2008 (lignes grises). La ligne noire représente les précipitations mensuelles moyennes (données : ORMVAM).

Pédologie

La carte pédologique utilisée provient de la base de données de l'UCL (source connue : mémoire de H. Mairesse) et est basée sur la classification d'Aubert, largement utilisée au Maroc. Au sein du CMV103, deux grands types de sols sont principalement rencontrés : des sols squelettiques, peu profonds, et des sols steppiques bruns ou châtains (figure 9).

Des analyses pédologiques détaillées ont été réalisées en 1956 par de Chevron-Villette (1956a) pour de nombreux profils au sein de la zone d'étude. Ces analyses ont été utilisées pour déterminer les propriétés moyennes des deux grands types de sols rencontrés au sein de la zone d'étude. L'emplacement des profils utilisés est présenté à la figure 9. Les analyses granulométriques réalisées à cette occasion ont été utilisées pour déterminer les propriétés hydrodynamiques des deux types de sol en utilisant des équations de pédotransfert (voir section 3.1 et annexe 2). Les résultats de ces analyses sont présentés au tableau 2.

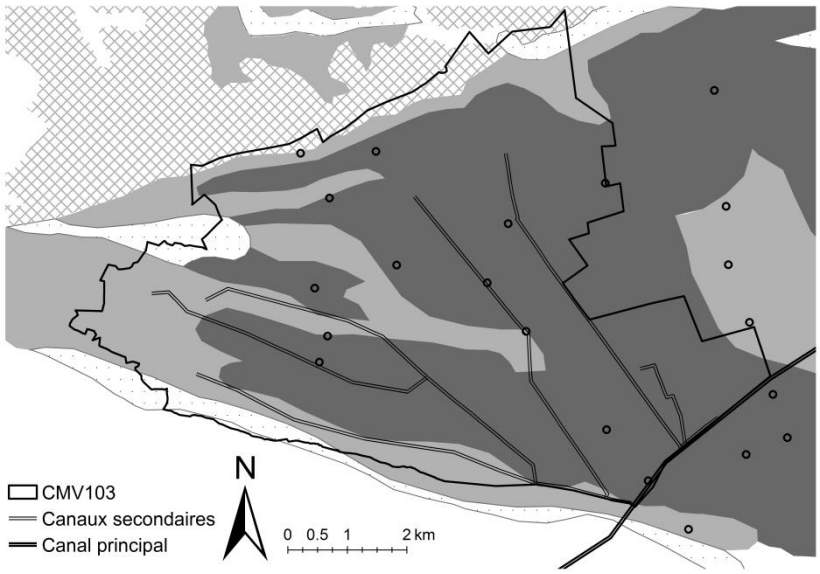


Figure 9 : Pédologie de la zone d'étude. Les zones gris foncé représentent les sols steppiques bruns ou châtains, les zones gris clair représentent les sols squelettiques peu profonds, les zones blanches pointillées représentent les autres classes de sol et les zones hachurées représentent les sols non-classés (collines). Les cercles noirs représentent les emplacements des profils pour lesquels la granulométrie mesurée en 1956 a été utilisée pour déterminer les propriétés hydrodynamiques du sol (sources : UCL (mémoire de H. Mairesse) pour la carte des sols et de Chevron-Villette 1956 pour la localisation des profils).

D'après ces résultats, les sols squelettiques semblent avoir une teneur en sable plus élevée et une teneur en argile plus faible que les sols steppiques. Ces impressions sont confirmées par les analyses de la variance (ANOVA), qui indiquent que les différences de teneur en sable sont significatives (la p_{value} varie de 0.011 à 0.016 selon l'épaisseur de profil considérée) et que les différences de teneur en argile sont significatives à très significatives (la p_{value} varie de 0.004 à 0.013 selon l'épaisseur de profil considérée) (Wasserman 2004 pour l'interprétation des p_{value}). Les teneurs en matière organique ne présentent quant à elles aucune différence significative selon le type de sol. Les différences observées confirment la pertinence de la classification ici retenue.

Tableau 2 : Granulométrie et teneur en matière organique des sols du CMV103 : valeurs moyennes et écarts types (source : de Chevron-Villette (1956)). Ces valeurs sont les valeurs moyennes, sur la profondeur de sol considérée, pour l'ensemble des profils analysés.

	Epaisseur considérée [cm]	Sable [%] (moyenne ± écart type)	Argile [%] (moyenne ± écart type)	Matière organique [%] (moyenne ± écart type)
Sols squelettiques (6 profils)	140	49.7 ± 9.7	24.9 ± 7.8	0.56 ± 0.17
	110	48.5 ± 9.6	26.0 ± 8.4	0.68 ± 0.18
	75	47.7 ± 7.8	26.1 ± 7.2	0.88 ± 0.23
	50	48.0 ± 5.6	25.6 ± 5.9	1.13 ± 0.28
Sols steppiques (15 profils)	140	38.2 ± 7.5	39.1 ± 9.1	0.44 ± 0.17
	110	38.1 ± 6.7	39.2 ± 8.5	0.53 ± 0.20
	75	38.5 ± 6.1	38.3 ± 8.2	0.67 ± 0.24
	50	40.1 ± 6.1	35.9 ± 8.0	0.83 ± 0.28

Piézométrie

Sur l'ensemble de la plaine, 30 piézomètres existent et sont gérés par l'ABHM. La plupart de ces piézomètres, pour lesquels les données sont disponibles à partir de 1971, ne sont aujourd'hui plus entretenus et les hauteurs piézométriques n'y sont plus relevées depuis un certain nombre d'années (tableau 3). A ce jour, seuls quatre piézomètres sont encore régulièrement suivis.

Les relevés effectués sur 7 piézomètres, situés aux alentours de la zone d'étude, sont utilisés dans le cadre de ce travail (figure 10). Un seul de ces piézomètres est directement situé au sein de la zone d'étude, le piézomètre 1007/7. Le tableau 3 synthétise les données disponibles pour ces différents piézomètres. Le niveau piézométrique moyen allait, en 1995, d'environ 90 m en amont de la zone d'étude à 60 m en aval, pour une distance d'environ 8 km. Le gradient moyen y était donc de l'ordre de 0.4%.

Tableau 3 : Synthèse des données disponibles pour les 7 piézomètres utilisés dans le cadre de ce travail. Ce tableau fait le point sur l'état des données en notre possession le 25 juin 2012 (source : ABHM).

		Altitude du piézomètre	Première mesure	Dernière mesure	Nombre de relevés	Fréquence moyenne
Zone d'étude	1007/7	89.5	16/02/1971	29/10/1999	142	5/an
	1017/7	95.6	25/02/1971	19/02/2011	221	5.5/an
Amont	1510/7	144.0	15/03/1991	25/09/2000	35	3.7/an
	1016/7	117.1	23/02/1971	02/06/1999	142	5/an
	1221/7	120.4	23/02/1971	05/07/2000	144	5/an
Aval	1009/7	59.8	16/02/1971	31/03/2005	141	4/an
	1269/7	72.9	16/04/1975	09/11/1996	107	5/an

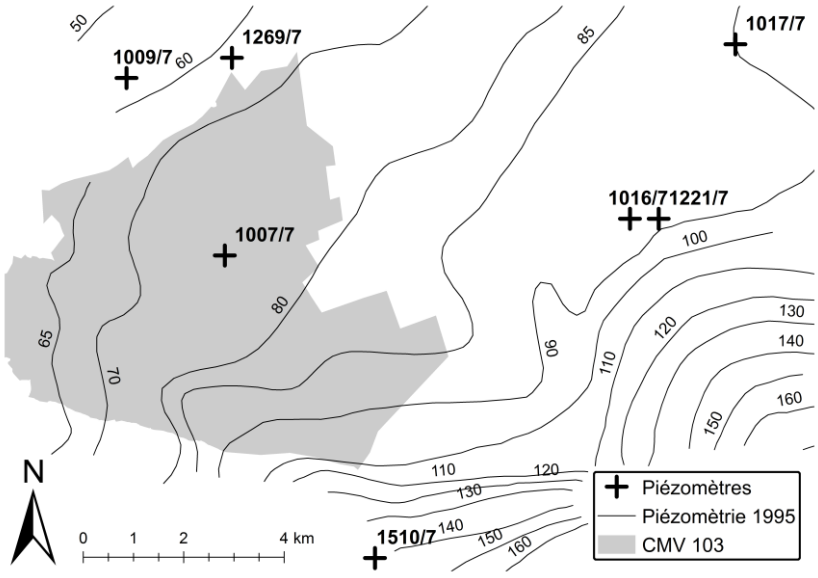


Figure 10 : Disposition des piézomètres utilisés par rapport à la zone d'étude et piézométrie moyenne de l'année 1995 [mètres au-dessus du niveau de la mer] (données : ABHM 2013).

Entre 1971 et 1999, le niveau piézométrique au sein de la zone d'étude vaut, en moyenne, 75 m et varie entre 69.1 et 80.4 m, soit une gamme de variation de 11.3 m (piézomètre 1007/7, figure 11). Par rapport au niveau du sol, le toit de la nappe varie donc entre 9.1 et 20.4 m de profondeur pour une profondeur moyenne de 14.5 m. La tendance générale est par ailleurs à la

baisse, le niveau piézométrique étant passé de 77 m en 1971 à 69.1 m en 1999. Les niveaux mesurés au piézomètre 1017/7, situé à 10 km du piézomètre 1007/7, sont très bien corrélés à ceux du piézomètre 1007/7 et pourront être utilisés pour extrapoler les niveaux piézométriques au sein de la zone d'étude après 1999 (figure 11 et section 3.3 pour plus de détails).

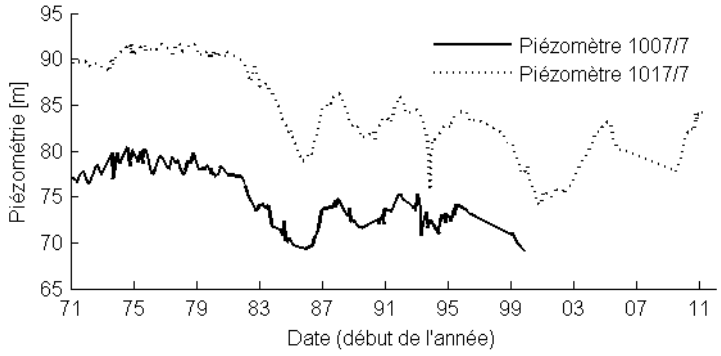


Figure 11 : Evolution des niveaux piézométriques relevés aux piézomètres 1007/7 et 1017/7, utilisés pour évaluer le niveau piézométrique au sein de la zone d'étude (voir section 3.3) (source : ABHM).

En amont de la zone d'étude, le gradient de la nappe est assez élevé, avec une baisse du niveau de la nappe de l'ordre de 60 m sur un transect de 3 km en 1995 (figure 10), soit un gradient de 2%, qui s'explique par la présence des monts Bni Snassens à cet endroit. L'utilisation du piézomètre 1510/7, situé plus haut dans ces monts, comme valeur de référence pour la piézométrie amont est donc discutable. Les piézomètres 1016/7 et 1221/7, bien que situés plus loin de la zone d'étude (figure 10), semblent plus appropriés pour représenter ce niveau piézométrique amont (voir section 3.3 pour plus de détails). Les niveaux mesurés dans ces deux piézomètres sont très similaires et ont une valeur moyenne de 85.7 m, soit environ 10 m de plus que le niveau mesuré au centre de la zone d'étude, au piézomètre 1007/7 (figure 12a). Notons, pour terminer, que l'évolution du niveau piézométrique de ces piézomètres présente une dynamique très similaire à celle observée au sein de la zone d'étude, bien que la gamme de variation y soit plus importante, de 12.7 m et de 16.3 m respectivement pour les piézomètres 1016/7 et 1221/7.

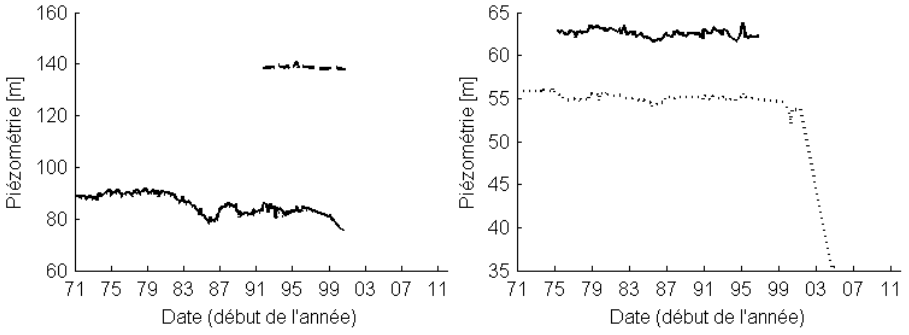


Figure 12 : Evolution des niveaux piézométriques utilisés pour évaluer le niveau piézométrique en amont (a) et en aval (b) de la zone d'étude (voir section 3.3). Sur la figure (a), le trait composé de tirets représente les relevés du piézomètre 1510/7 et le trait plein représente ceux du piézomètre 1221/7. Ceux du piézomètre 1016/7 sont représentés par un trait pointillé, qui se confond avec le trait du piézomètre 1221/7. Sur la figure (b), le trait plein représente les relevés du piézomètre 1269/7 et les pointillés ceux du piézomètre 1009/7 (source : ABHM).

Enfin, en aval de la zone d'étude, la situation est moins claire. Les deux piézomètres, pourtant distants d'à peine 2 km l'un de l'autre, présentent de niveaux moyens très différents (55.1 m pour le piézomètre 1009/7 et 62.6 m pour le piézomètre 1269/7 avant 2000). Leur gamme de variation, avant l'an 2000, y est par ailleurs moindre qu'en amont, 4.1 m et 2.1 m respectivement pour les piézomètres 1009/7 et 1269/7. Enfin, entre le 25 avril 2001 et le 24 aout 2004, aucune mesure n'est disponible. La mesure du 24 aout 2004 indique une diminution drastique du niveau de la nappe par rapport à la mesure du 25 avril 2001, diminution de plus de 18 m ! Le niveau semble se stabiliser ensuite puisque les mesures effectuées plus tard en 2004 et 2005, date de la dernière mesure, donnent des niveaux similaires à celui d'aout 2004. Cette brusque diminution reste pour nous inexpliquée et pourrait donc être attribuée à un événement naturel ou anthropique mais également à un biais de mesure apparu entre 2001 et 2004.

Données agronomiques

Les données agronomiques en notre possession proviennent de l'ORMVAM. Il s'agit d'abord d'un recensement des agriculteurs pour l'ensemble du CMV103 qui a été réalisé au premier semestre 2009. Sont disponibles dans ce recensement la liste des agriculteurs du CMV103, la taille officielle de

leur exploitation, leur titre foncier et le numéro de leur prise d'eau, la liste exhaustive des cultures pratiquées dans chaque exploitation, les superficies cultivées pour chacune de ces cultures et la présence d'une station de pompage (pour certains secteurs hydrauliques uniquement).
La somme des superficies officielles est de 4030 ha pour 667 agriculteurs répertoriés, ce qui donne une taille d'exploitation moyenne de 6 ha. La somme des superficies effectivement cultivées donne un total de 3260 ha. 81% des superficies sont donc effectivement cultivées, les 19% restant étant constitués des bâtiments d'exploitation, bassins de retenue d'eau, chemins entre les parcelles, etc.
Parmi les superficies effectivement cultivées, 70.6% sont des cultures d'agrumes (indifférenciées dans le recensement). Suivent, par ordre d'importance, les pommes de terre (10%), les céréales (6.2%), les cultures arboricoles diverses (4.6%), le maraichage divers (2.8%), la luzerne (2.1%) et les artichauts (1.5%). Les autres cultures recensées représentent moins de 1% des superficies cultivées ; il s'agit des vignes, des oliviers, du fourrage, des betteraves, des haricots et des tomates.
Par ailleurs, un second document, spécialement rédigé par l'ORMVAM à notre intention, recense les agriculteurs du CMV103 ayant bénéficié du subside gouvernemental pour l'installation de la technologie goutte-à-goutte jusque 2012. Année par année, l'évolution du nombre d'agriculteurs et des superficies irriguées au goutte-à-goutte peut donc être reconstituée en faisant l'hypothèse que les agriculteurs ayant bénéficié de ces subsides n'abandonnent pas cette technologie après son installation. Ce document ne recense toutefois que les agriculteurs qui ont fait appel au subside gouvernemental, les agriculteurs ayant adopté cette technologie sur fonds propres (rares il y a quelques années mais de plus en plus fréquents aujourd'hui) n'étant recensés nulle part.
D'après ce document, le premier agriculteur a adopté le goutte-à-goutte en 2002 et, fin 2011, 109 agriculteurs (16.3%) pratiquaient le goutte-à-goutte pour un total de 1041 ha irrigués au goutte-à-goutte (32%). Malheureusement, les correspondances entre les agriculteurs tels qu'ils sont renseignés dans les deux documents disponibles ne sont pas toujours évidentes à établir. Ainsi, seuls 84 des 109 agriculteurs ont pu être retrouvés dans le recensement, pour une superficie totale des exploitations de 1003 ha (24.9% de la superficie exploitée dans la plaine) et une superficie effectivement cultivée de 955 ha (29.3% des superficies effectivement cultivées) (figures 13 et 14).

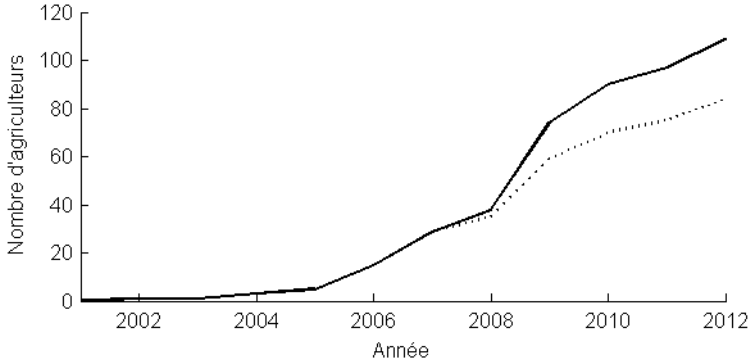


Figure 13 : Evolution du nombre d'agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte dans le CMV103 (2001-2012). Le trait plein représente le nombre d'agriculteurs ayant officiellement obtenu le subside à la conversion. Le trait pointillé représente les agriculteurs ayant officiellement obtenu le subside à la conversion pour lesquels les données ont été retrouvées dans le recensement du premier semestre 2009 (données : ORMVAM).

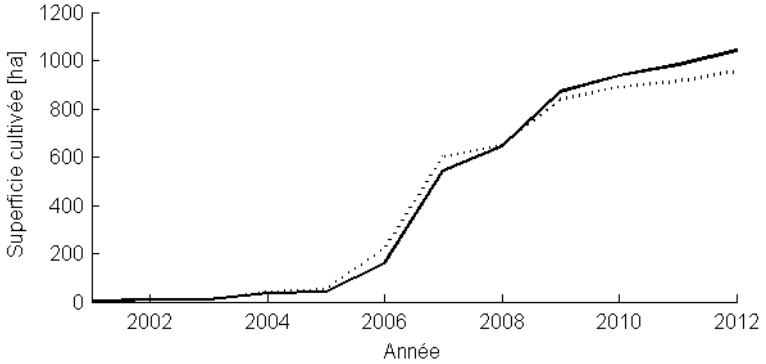


Figure 14 : Evolution des superficies cultivées [ha] irriguées par irrigation goutte-à-goutte dans le CMV103 (2001-2012). Le trait plein représente les superficies officiellement renseignées lors de l'octroi du subside à la conversion. Le trait pointillé représente les superficies déclarées dans le recensement 2009 ayant officiellement obtenu le subside à la conversion des agriculteurs pour lesquels les données ont été retrouvées dans le recensement du premier semestre 2009 (données : ORMVAM).

Débit dans les canaux d'irrigation

Les données de débit proviennent de l'ABHM. Elles furent rassemblées spécifiquement à notre intention par l'ORMVAM et ne reprennent que le

total des débits dans les canaux secondaires alimentant le CMV103 ; il s'agit donc du débit total alimentant le CMV103 dans son ensemble. Les données sont disponibles au pas de temps mensuel entre septembre 1994 et février 2015.

Le débit moyen montre une saisonnalité assez marquée, avec un minimum de 0.05 m³/s en janvier et un maximum de 0.7 m³/s en juillet (figure 15). En moyenne, ce sont donc 11.6 hm³ qui sont apportés chaque année au CMV103, ce qui représente un apport annuel moyen de 357.2 mm d'eau répartis sur les 3260 ha qui y sont effectivement cultivés.

Enfin, les valeurs mesurées d'une année à l'autre peuvent varier très fortement autour de la moyenne, que ce soit durant les saisons sèches ou les saisons humides (figure 15). Les valeurs maximales se retrouvent principalement entre juin et aout et culminent aux alentours de 1.2 m³/s. Les faibles valeurs parfois observées à cette période ne peuvent vraisemblablement être attribuée qu'à une pénurie d'eau depuis le barrage ou à une interruption volontaire de l'alimentation en eau, en aucun cas à une faible demande car la pluie est systématiquement insuffisante à cette période (figure 8).

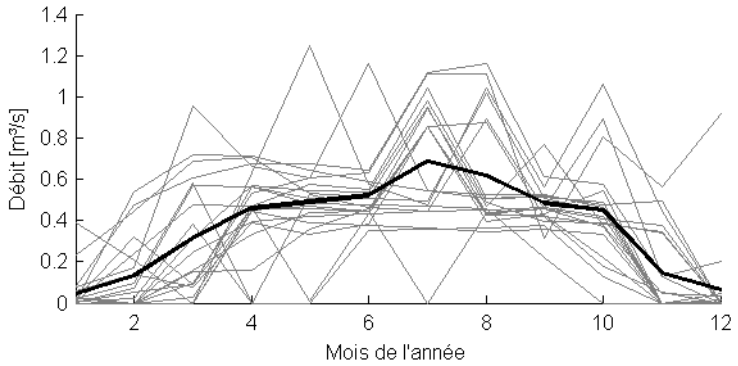


Figure 15 : Débits mensuels alimentant le CMV103 depuis le barrage Mohamed V pour les années 1995 à 2014 (lignes grises). La ligne noire représente le débit mensuel moyen (données : ORMVAM).

Données collectées pour un échantillon d'agriculteurs

Afin de compléter le jeu de données nécessaire à la réalisation de ce travail, une série d'agriculteurs constituant un échantillon représentatif des agriculteurs de la zone d'étude ont été rencontrés. Des entretiens ont été

réalisés, poursuivant un double objectif : collecter un certain nombre de données non-disponibles auprès des administrations d'une part et, d'autre part, comprendre, de manière plus qualitative, la manière dont les agriculteurs de la zone d'étude gèrent leur exploitation.
Ces entretiens ont été réalisés au cours de deux campagnes, la première en mars 2012 et la seconde en mars 2013. Ces entretiens étaient de type semi-directif. Le principe de ce type d'entretien est d'avoir une discussion ouverte avec l'agriculteur, qui ne se limite pas à une séance de questions-réponses, et d'orienter cette discussion sur les thématiques d'intérêt en veillant à ce que les réponses à une série de questions précises et préalablement identifiées soient apportées durant l'entretien. En fin de discussion, les aspects factuels et précis sont abordés de manière à obtenir les données précises et chiffrées nécessaires pour implémenter la méthodologie envisagée (Aubin 2012, discussion personnelle).

Présentation de l'échantillon

La sélection des exploitations a été réalisée sur base d'un certain nombre de critères préalablement identifiés comme susceptibles d'influencer l'efficience de l'irrigation : la technologie d'irrigation (gravitaire vs. goutte-à-goutte), les cultures pratiquées, le type de sol (squelettique vs. steppique) et la taille de l'exploitation. L'objectif de l'échantillonnage consistait à se rapprocher le plus possible de la distribution observée au sein de la zone d'étude pour ces différents critères, à l'exception de la technologie d'irrigation. En tant que principal sujet d'étude, l'objectif était en effet d'avoir un échantillon composé, à cet égard, de 50% d'exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire, les 50% restant pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte.
Tout en gardant ces valeurs à l'esprit, la sélection finale des exploitations eut lieu directement sur le terrain, en collaboration avec les agents du CMV103 et en étant ouvert aux imprévus, rencontre inopinée d'agriculteurs ou, à l'inverse, indisponibilité d'agriculteurs initialement ciblés. Notons qu'un critère en particulier s'est avéré impossible à contrôler et fut dès lors laissé de côté lors de la sélection finale des agriculteurs : il s'agit du type de sol. Sur le terrain, les limites entre les deux types de sol sont en effet difficiles à identifier précisément dans le cadre d'une campagne d'entretiens et de nombreuses exploitations sont situées à cheval sur plusieurs types de sol.
Au total, 17 agriculteurs furent rencontrés lors de la campagne de mars 2012 et 9 agriculteurs furent rencontrés lors de la campagne de mars 2013. Ces rencontres eurent lieu en présence d'un agent du CMV103 à la retraite ou

d'un chauffeur de l'UMP qui assistait la traduction. Sur les 26 exploitations ainsi analysées, une fut directement écartée. Aussi bien l'exploitation, à cause de sa forme extrêmement allongée et donc très particulière, que l'exploitant, à cause d'un parcours de vie peu conventionnel, présentaient des caractéristiques très particulières qui se traduisaient par des pratiques d'irrigation extrêmes et absolument non-représentatives de la zone d'étude. Cette exploitation fut donc considérée comme *outlayer* et écartée de l'échantillon. 25 exploitations furent donc analysées, ce qui représente 68 parcelles dont 56 sont régulièrement irriguées et donc analysées (figure 16).

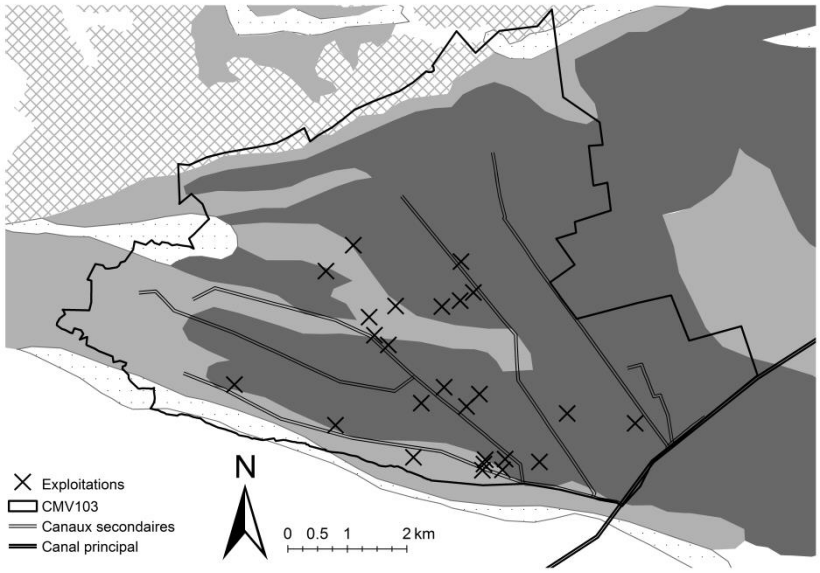


Figure 16 : Localisation des 25 exploitations analysées sur fond de carte pédologique. Les zones gris foncé représentent les sols steppiques bruns ou châtains, les zones gris clair représentent les sols squelettiques peu profonds, les zones blanches pointillées représentent les autres classes de sol et les zones hachurées représentent les sols non-classés.

Au regard des critères considérés, la distribution des exploitations étudiées est présentée au tableau 4. L'échantillon est équilibré par rapport au type d'irrigation (13 agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire, 12 le goutte-à-goutte). La taille des exploitations analysées est par contre déséquilibrée ; les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire sont plus petites que la moyenne tandis que celles pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte sont plus grandes que la moyenne (tableau 4). Cette moyenne est toutefois influencée

par la très grande taille d'une seule exploitation, 400 ha. Ainsi, la taille médiane des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte n'est que de 4.2 ha, contre 4 ha pour les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire. Notons par ailleurs que, pour l'ensemble du CMV103, la répartition de cette taille est elle-aussi déséquilibrée au regard du type d'irrigation mais dans une moindre mesure : en 2012, la taille moyenne des exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire était en effet de 5.5 ha tandis que celle des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte était de 12.2 ha. Enfin, 65% des superficies échantillonnées pratiquant l'irrigation gravitaire sont plantées avec des agrumes tandis que c'est le cas de 82% de celles pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte. A l'échelle du CMV, cette valeur est très légèrement déséquilibrée (69.7% pour le gravitaire et 73.0% pour le goutte-à-goutte). Par ailleurs, 9 des 12 exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte analysées ne cultivent que des cultures d'agrumes. Cela reflète également la réalité puisque c'était le cas de 66.6% des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte en 2012.

Tableau 4 : Synthèse des caractéristiques de l'échantillon d'agriculteurs rencontrés : nombre d'agriculteurs, taille de l'exploitation et cultures d'agrumes pour les différents types d'irrigation.

	Irrigation gravitaire		**Irrigation goutte-à-goutte**		**CMV103**
	Moyenne ± écart type	Gamme	Moyenne ± écart type	Gamme	Moyenne
Nombre d'exploitations	13		12		
Nombre de parcelles	28		28		
Taille de l'exploitation [ha]	3.4 ± 1.9	[0.15-5.7]	43.2 ± 113.9	[1.45-400.0]	6
Superficie cultivée	2.7 ± 1.7	[0.1-5.3]	36.1 ± 99.4	[0.8-349.2]	4.9
Agrumes [% de superficie cultivée]	64.7 ± 38.9	[0-100]	82.5 ± 38.6	[0-100]	70.6
Nombre d'exploitations 100% agrumes	3		9		
Nombre d'exploitations 0% agrumes	3		2		

Sur base de cette analyse, il s'avère que l'échantillon d'agriculteurs correspond aux critères établis en ce qui concerne le type d'irrigation et les cultures pratiquées. Concernant la distribution de la taille des exploitations, la différence de taille observée en fonction du type d'irrigation pour

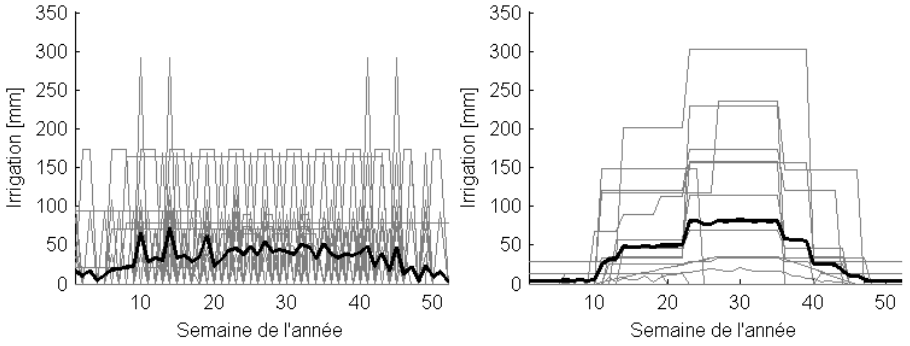
l'ensemble des exploitations de la zone d'étude se retrouve dans notre échantillon mais de manière très marquée.

Présentation des données collectées

Les données collectées au cours de ces entretiens sont multiples. Outre les données générales déjà disponibles (superficies, cultures, type d'irrigation…), elles concernent tout d'abord les volumes d'eau d'irrigation appliqués sur les différentes parcelles cultivées et l'origine de cette eau. Ensuite, une série de données socio-économiques ont été collectées. Ces données concernent par exemple la filière de vente de la production agricole, le statut foncier des terres exploitées, le niveau de formation du gestionnaire de l'exploitation, les rendements, prix de vente et couts de production des différentes cultures, etc. Un tableau synthétisant l'ensemble de ces données est présenté en annexe 1.

Irrigation

Les données relatives aux volumes d'eau d'irrigation appliqués sont cruciales pour la suite de la thèse. Malheureusement, l'enregistrement systématique des volumes appliqués ou même des dates d'irrigation est extrêmement rare dans la zone d'étude. Les agriculteurs connaissent par contre leurs pratiques usuelles et étaient donc en mesure de donner des explications sur base desquelles la reconstitution des épisodes d'irrigation habituels fut rendue possible. Ces explications concernent aussi bien la fréquence d'irrigation (*2 fois par mois de telle à telle période, puis 3 fois par mois à telle autre…* ou *une heure par jour de telle à telle période, puis une heure et demie…*) que les volumes appliqués, connus grâce aux modules hydrauliques de l'ORMAVM et aux débitmètres des pompes (*4 heures à 30 l/s depuis le canal d'irrigation puis une heure à tel débit avec la pompe…*). Sur cette base, les pratiques d'irrigation standard ont pu être reconstituées pour les parcelles irriguées des agriculteurs rencontrés (figure 17).



(a) (b)

Figure 17 : Irrigation hebdomadaire [mm] des parcelles des agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire (a) et goutte-à-goutte (b) rencontrés (trait gris). Les traits noirs représentent l'irrigation hebdomadaire moyenne [mm] des agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire (a) et goutte-à-goutte (b).

Les volumes appliqués varient très fort d'un agriculteur à l'autre (figure 17). Ainsi, chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire, le volume annuel d'irrigation appliqué varie de 70 à 6220 mm selon les parcelles pour une moyenne de 1676 mm. Lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée, ce volume varie de 216 à 7704 mm pour une moyenne de 2063 mm. Comparativement aux besoins nets en eau moyens estimés précédemment (567 mm/an), les apports d'eau d'irrigation moyens sont donc nettement excessifs, quelle que soit la technologie d'irrigation utilisée.

Enfin, la dernière information disponible concerne le pourcentage d'eau d'irrigation pompé dans la nappe. Ce pourcentage varie très fort d'un agriculteur à l'autre, sans lien clair avec la technique d'irrigation. Ainsi, chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire, ce pourcentage varie de 0 à 100% sur base annuelle pour une moyenne de 47.3% et un écart type de 33.2%. Chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte, il varie de 10 à 100% pour une moyenne de 73.2% et un écart type de 38.1%.

Données socio-économiques

Une série de caractéristiques socio-économiques des exploitations analysées ont également été collectées. La plupart de ces données sont disponibles pour l'ensemble des exploitations analysées. Toutefois, certaines données n'ont pu être collectées pour toutes ces exploitations et ne sont disponibles que pour certaines de celles-ci. Toutes ces données ne sont disponibles que pour les exploitations visitées et la représentativité des exploitations visitées

par rapport à l'ensemble de la zone d'étude ne peut donc, à ce niveau, être évaluée.

Ces données sont synthétisées au tableau 5. La filière de vente semble varier en fonction du type d'irrigation, avec une majorité des cultures exportées lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée et l'inverse lorsqu'il s'agit de l'irrigation gravitaire. Le statut foncier est très variable mais apparait plus instable chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte, ce qui est surprenant. L'adoption de cette technologie requiert en effet des investissements importants qui ne peuvent être amortis qu'à long terme et sont donc, *a priori*, susceptibles d'être freinés par un statut foncier instable. La formation du gestionnaire est systématiquement limitée à l'expérience quand l'irrigation gravitaire est pratiquée. Elle est plus variée lorsqu'il s'agit du goutte-à-goutte. Ce niveau de formation n'est cependant disponible que pour une partie des exploitations analysées. La présence d'aide structurelle au sein de l'exploitation présente également une distribution différente selon la technique d'irrigation pratiquée : elle est plus fréquemment rencontrée au sein des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte. Cette donnée n'est pas non plus disponible pour l'ensemble des exploitations analysées.

Enfin, les données économiques montrent que la production est, en moyenne, plus élevée sur les parcelles équipée en goutte-à-goutte. Certains chiffres appellent toutefois à la prudence. Des niveaux de production de 100 t/ha, rapportés par certains agriculteurs, semblent en effet peu réalistes. Le prix de vente et les coûts de production sont tous deux plus élevés lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée, ce qui est *a priori* cohérent. Ces données économiques doivent être manipulées avec précaution. Elles sont traditionnellement délicates à obtenir (et ne sont d'ailleurs disponibles que pour une partie des parcelles analysées), les chiffres communiqués sont rarement clairement définis par les agriculteurs et certaines données posent question, par exemple lorsque l'intégration des différentes données donne des revenus négatifs.

Tableau 5 : Synthèse des données socio-économiques collectées auprès des 25 agriculteurs rencontrés en mars 2012 et mars 2013.

	Irrigation gravitaire	Irrigation goutte-à-goutte
Filière de vente [# parcelles]	(manquant : --)	
Locale	17	6
Internationale	11	22
Statut foncier [# exploitations]	(manquant : --)	
Propriétaire	8	4
Locataire (long terme)	1	2
Héritier (instable)	4	6
Formation du gestionnaire [# exploitations]	(manquant : 9)	
Expérience	10	4
Technique inférieure	0	0
Technique supérieure	0	2
Aide structurelle [# exploitations]	(manquant : 9)	
Aucune	5	1
Famille	2	0
Ouvriers	3	5
Données économiques (par parcelle) (moyenne ± écart type) [gamme]	(manquant : 17)	
Production [t/ha]	11.4 ± 11.6 [1-36]	28.2 ± 30.8 [5-100]
Prix de vente [10^3 Dh/ha]	29.3 ± 29.2 [3-100]	32.7 ± 16.8 [11-85.7]
Couts de production [10^3 Dh/ha]	18.4 ± 16.2 [1.5-60]	24.8 ± 13.7 [6.5-50]

Conclusion

L'ensemble des données présentées dans ce chapitre seront utilisées tout au long du travail. Il était donc important de les présenter brièvement. Toutes les données utilisées plus loin, si elles ne sont pas explicitement présentées ici, dérivent de ces données. Les manipulations effectuées seront alors clairement explicitées.

Chapitre 3 - Notions d'efficience

L'efficience de l'irrigation est définie comme le rapport entre le volume d'eau d'irrigation consommé par les plantes et le volume d'eau prélevé à la source. Ce concept renvoie donc directement à l'utilisation d'eau pour l'irrigation. Le déploiement de la technologie goutte-à-goutte ayant pour premier objectif explicite de réduire la consommation d'eau agricole, la première partie de ce travail est donc naturellement consacrée à l'étude de cette efficience.

Le premier objectif du travail vise à mettre en évidence l'importance de l'usage sur le niveau d'efficience de l'irrigation effectivement atteint. Cette question est d'abord abordée à l'échelle de la parcelle. Dans un premier temps, l'efficience de l'irrigation est calculée pour un certain nombre de parcelles de la zone d'étude et la variabilité de cette efficience est analysée. L'importance de l'usage y est ainsi démontrée, menant à la notion d'*effet d'usage* e_u. La relation entre l'usage et la technique d'irrigation est ensuite abordée. En considérant certaines caractéristiques des exploitations comme des indicateurs de leur gestion (M), une relation entre *effet d'usage* et technique d'irrigation est mise en évidence et quantifiée, ce qui permet la reformulation de la notion d'*effet d'usage* en $e_{u_Ti}(M_{Ti})$. Cet aspect permet de répondre au deuxième objectif de ce travail.

Sur la base de ces résultats, la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte peut être évaluée en termes d'efficience à l'échelle de la parcelle. La dernière étape de ce chapitre consiste à étudier la mesure dans laquelle ces observations à l'échelle de la parcelle se traduisent en termes de pression sur les ressources en eau à l'échelle globale.

La modélisation du cycle de l'eau à l'échelle de la zone d'étude permet ce changement d'échelle. L'intégration des changements d'efficience associés au changement de technique d'irrigation de l'ensemble des agriculteurs de la zone d'étude dans ce modèle permet en effet d'étudier l'évolution des pressions sur les ressources en eau conjointement à l'évolution de la technique d'irrigation. L'impact de la conversion progressive à l'irrigation goutte-à-goutte sur les ressources en eau est donc quantifié, ce qui apporte une première partie de réponse au quatrième objectif de cette étude.

3.1 - De l'importance d'intégrer l'usage dans le calcul de l'efficience de l'irrigation à l'échelle parcellaire : la notion d'*effet d'usage*

Introduction

L'agriculture irriguée représente, à l'échelle mondiale, environ 70% de la consommation d'eau douce (FAO 2014). En vue d'apporter une réponse crédible au problème hydrique qui touche de nombreuses régions du monde, il est dès lors indispensable de s'intéresser à ce secteur et de proposer des solutions qui permettent de réduire significativement sa consommation d'eau.

La notion d'*efficience* semble, à première vue, être un angle à la fois pertinent et approprié pour appréhender ce problème. En effet, et bien que de nombreuses expressions liées à la notion d'*efficience* coexistent, cette notion réfère généralement au rapport entre l'eau « utilisée » par les plantes (la signification précise de ce terme pouvant varier selon les expressions) et l'eau « prélevée » à la source (terme dont la signification précise peut également varier).

Parmi l'ensemble des indicateurs référant à cette notion d'*efficience*, trois sont particulièrement utilisés et leurs spécificités sont très bien synthétisées par van Halsema and Vincent (2012). La productivité de l'eau (water productivity WP) est définie comme le rapport entre les rendements agricoles et l'eau consommée par la culture et est particulièrement utilisée pour évaluer le fonctionnement de la culture du point de vue agronomique. L'efficience de l'utilisation de l'eau (*water use efficiency WUE*) est définie comme le rapport entre le rendement agricole et l'eau appliquée. Cet indicateur est autant utilisé qu'il est décrié, en particulier car il mélange des aspects techniques et agronomiques, ce qui le rend difficilement interprétable et utilisable. Enfin, l'efficience de l'irrigation (irrigation efficiency IE) est définie comme le rapport entre l'eau consommée par les cultures irriguées et le total de l'eau appliquée (Burt et al. 1997). Cet indicateur se focalise exclusivement sur la consommation d'eau, n'intégrant aucune composante agronomique, et est donc très populaire dans le domaine de l'ingénierie et de la gestion de l'eau.

Ce dernier indicateur, l'efficience de l'irrigation *IE*, eut et a toujours énormément de succès dans le monde de l'irrigation, et ce pour deux raisons.

D'une part, il permet, pour l'ingénieur, de convertir les besoins en eau des plantes en besoin de prélèvement à la source en se basant sur des valeurs de référence. Il est alors fréquemment utilisé au cours des différentes étapes de conception, planification et amélioration des systèmes d'irrigation. D'autre part, il est fréquemment utilisé pour évaluer *a posteriori* le fonctionnement d'un système en comparant les valeurs d'IE effectivement observées à des valeurs de référence.

L'efficience de l'irrigation *IE* peut être scindée en efficience de transport (*conveyance efficiency* η_c) et efficience d'application (*application efficiency* η_a) (Bos and Nugteren 1990; Tiercelin 2006; van Halsema and Vincent 2012). L'efficience de transport dépend principalement de la qualité des infrastructures hydrauliques tandis que l'efficience d'application est généralement vue comme dépendant essentiellement de la technique d'application. Puisque l'amélioration structurelle de l'efficience de transport implique des investissements financiers importants et une mise en œuvre longue et laborieuse, l'efficience d'application est souvent vue comme le paramètre clé à optimiser afin d'améliorer l'efficience de l'irrigation *IE* (Knox et al. 2012; Boelens and Vos 2012). De cet état de fait découle la promotion de techniques d'application associées à des valeurs d'efficience d'application ηa élevées, la plus populaire de celles-ci étant l'irrigation localisée *via* la technique du goutte-à-goutte.

L'utilisation de l'indicateur d'efficience de l'irrigation *IE*, ainsi que son interprétation, posent par ailleurs de nombreuses questions. L'utilisation même du terme « efficience » peut prêter à confusion et est régulièrement critiquée (Willardson et al. 1994; Perry 2008; Pereira et al. 2012). Si les spécialistes sont généralement bien conscients des limites de l'utilisation de cet indicateur, l'hypothèse faite par nombre de gestionnaires et décideurs selon laquelle technique d'utilisation dite « efficiente » (ayant des valeurs de η_a élevées) permettrait d'économiser de l'eau est discutable. Les concepts d'efficience permettent en effet d'estimer les performances de la technologie et non celles du système en tant que tel (van Halsema and Vincent 2012).

Un autre problème de cet indicateur consiste en sa dépendance à l'échelle d'application, aussi bien spatiale que temporelle. Ainsi, certaines études ont montré qu'un changement drastique d'échelle spatiale de calcul pouvait se traduire par un changement tout aussi important de valeur d'efficience d'irrigation. Les valeurs d'*IE* mesurées par ces études passent ainsi de très mauvaises (30%) à bonnes (80%) si la fraction d'eau initialement considérée comme perdue peut être réutilisée (Clarck and Aniq 1993; Guillet 2006 cités par van Halsema and Vincent 2012). Enfin, cet indicateur n'intègre que des

considérations techniques, occultant totalement les aspects socio-économiques liés à l'irrigation (*e.g.* van Halsema and Vincent 2012; Boelens and Vos 2012).

L'utilisation de l'efficience d'irrigation *IE* comme indicateur du bon fonctionnement d'un système d'irrigation, voire comme un indicateur de l'efficacité de l'utilisation de l'eau, semble donc loin d'être triviale. La multiplication des campagnes de promotion de technologies réputées « efficientes », basées sur cette hypothèse et ayant pour but de diminuer la consommation d'eau agricole, mérite donc d'être analysée au regard de ces critiques. La technique d'application influence certes l'efficience de l'irrigation mais d'autres facteurs entrent également en compte pour déterminer l'efficience de l'irrigation *IE* effectivement observée. En particulier, la gestion de l'irrigation – l'usage qui est effectivement fait d'une technique particulière – a sans doute autant d'influence que la technique d'application à proprement parler.

L'objectif de cette section est de démontrer que l'usage joue un rôle non négligeable sur l'efficience de l'irrigation et d'analyser les importances respectives de la technique et de l'usage sur cette efficience. Il sera ainsi démontré que cet usage doit être intégré au calcul de l'efficience pour que celle-ci soit correctement appréhendée.

Méthodologie

Formulation mathématique

Mathématiquement, le problème peut être formulé comme suit : soit I la quantité d'eau appliquée à la parcelle sur l'ensemble de la période étudiée et *NIWR* (*Net Irrigation Water Requirement*) les besoins en eau nets de la culture pour cette même période, l'efficience η peut être exprimée par l'équation 1. Sous l'hypothèse que les besoins en eau de la plante sont satisfaits et que la consommation d'eau d'irrigation est donc égale aux besoins nets en eau d'irrigation, l'efficience η est alors égale à l'efficience de l'irrigation *IE* telle que définie précédemment.

$$\eta = \frac{NIWR}{I} \quad \textbf{(1)}$$

Comme expliqué dans l'introduction, la vision traditionnelle voit par ailleurs l'efficience de l'irrigation *IE* comme le produit de l'efficience de transport η_c et de l'efficience d'application η_a. Ce produit étant purement technique, nous

reformulons ce concept en le qualifiant d'*efficience technique* n_t (équation 2).

$$\eta_t = \eta_a \cdot \eta_c \quad \textbf{(2)}$$

Afin de démontrer l'importance de l'usage, nous formulons l'hypothèse selon laquelle η diffère de η_t car cette dernière valeur n'intègre pas l'usage, à l'inverse de η. Le rapport entre ces deux valeurs représenterait dès lors l'effet de l'usage, qui dépend lui-même de la gestion de l'agriculteur (*M*). Nous introduisons donc le concept d'*effet d'usage* $e_u(M)$, ce qui nous permet d'écrire l'équation 3.

$$\eta = \eta_t \cdot e_u(M) \quad \textbf{(3)}$$

Mathématiquement, l'objectif de cette section est donc double. Il s'agit (1.) de démontrer que $\eta \neq n_t$ et dès lors de démontrer l'existence de e_u et (2.) de montrer que e_u est effectivement une fonction de la gestion *M* et de justifier ainsi la formulation $e_u(M)$.

Collecte des données

Afin de remplir cet objectif, une série de données génériques (occupation du sol, pédologie, topographie, météorologie, piézométrie…) ont d'abord été collectées auprès des administrations compétentes. Une enquête de terrain détaillée a ensuite permis de caractériser les pratiques agricoles et de compléter le jeu de données nécessaire au calcul de l'efficience. Ces données sont décrites en détail au chapitre 2, section 2. Le bilan hydrique des parcelles caractérisées a ainsi pu être réalisé et leur efficience d'irrigation fut ainsi obtenue.

Les données météorologiques sont disponibles au pas de temps quotidien. Il s'agit de la pluie (disponible de 1992 à 2004) et des températures minimales et maximales (disponibles de 1996 à 2012). Ces données sont moyennées pour chaque année disponible de manière à obtenir des données quotidiennes moyennes, processus indispensable car les données d'irrigation disponibles ne sont valables que pour des années standards. Ces données sont supposées constantes sur l'ensemble de la zone d'étude.

Les données pédologiques englobent une carte des sols ainsi que des données analytiques collectées au cours d'une campagne de mesure détaillée mais assez ancienne (de Chevron-Villette 1956). La granulométrie du sol est

ainsi disponible pour un grand nombre de profils jusque 150 cm de profondeur. Les valeurs de granulométrie ont alors été rassemblées par classe pédologique sur la base de la carte des sols Des valeurs moyennes de granulométrie ont ainsi pu être attribuées à chaque classe pédologique. Ces données peuvent être visualisées en annexe 2.
Les données agricoles liées à l'irrigation (quantités et timing), à la taille des parcelles et à leur localisation, les pratiques agronomiques et de gestion ainsi qu'une série de caractéristiques d'ordre socio-économique ont été collectées au moyen d'entretiens détaillés auprès des exploitants. 25 agriculteurs furent rencontrés en 2012 ou 2013, cultivant 56 parcelles irriguées. Afin de faciliter la communication avec les agriculteurs, des agents du service de vulgarisation local participèrent à ces entretiens. Chaque exploitation fut inspectée afin de vérifier et de valider les informations récoltées. Il est important de noter que, la plupart des exploitations n'enregistrant pas systématiquement leur historique d'irrigation, les données relatives à la gestion de l'irrigation restent approximatives. Des scénarios d'irrigation ont donc dû être reconstitués sur la base des processus de décision décrits durant les entretiens, et ce pour les 56 parcelles irriguées.

Calcul de l'efficience de l'irrigation

L'efficience de l'irrigation η est calculée à partir du bilan hydrique parcellaire (équation 4). Ce bilan est effectué au pas de temps quotidien.

$$S_t = S_{t-1} + (P_t + I_t - ET_t - Q_t) \quad \textbf{(4)}$$

avec S_t le stock dans la zone racinaire [mm], P_t les précipitations [mm], I_t l'irrigation [mm], ET_t l'évapotranspiration réelle et Q_t le drainage profond [mm]. ET_t est calculée à partir de la méthode de la FAO (procédure du *dual crop* coefficient, Allen et al. 1998) dans laquelle $ET_t = (K_{s_t}.K_{cb_t}+K_{e_t}).ET_{0t}$ avec K_{cb_t} le coefficient cultural de base (*basal crop coefficient*), K_{s_t} l'effet du stress hydrique et K_{e_t} le coefficient qui représente l'évaporation depuis la surface du sol. Ces coefficients sont déterminés à partir des tables de référence et de la procédure décrite par Allen et al. (1998). Seules les données climatiques de base étant disponibles, l'évapotranspiration de référence ET_0 est calculée sur une base quotidienne à partir de l'équation de Hargreaves ($ET_0 = 0.0023.R_a.(TC+17.8).TR^{0.5}$ où $TC = T_{min}+(T_{max}-T_{min})/2$ et $TR = T_{max}-T_{min}$, T_{max} et T_{min} représentant respectivement les températures maximales et minimales quotidiennes et R_a la radiation extraterrestre

(Hargreaves and Allen 2003)). La profondeur racinaire a été estimée sur la base des valeurs de référence données par Allen et al. (1998) et est fixée à 1.4 m pour les cultures d'agrumes, de nèfles et de céréales, 1.1 m pour les tomates, 0.75 m pour les betteraves et 0.5 m pour les pommes de terre.
La méthode utilisée fait l'hypothèse que le sol est homogène et que l'eau est uniformément distribuée en son sein. Les caractéristiques hydrodynamiques du sol sont obtenues *via* la relation de van Genuchten (1980). Les paramètres de cette relation sont obtenus en appliquant les équations de pédotransfert décrites par Wösten et al. (1998), Schaap et al. (2001) et Weynants et al. (2009). Ces équations sont présentées en annexe 2. La densité apparente est obtenue en utilisant la relation décrite par Bollen et al. (1995).
Comme suggéré par Allen et al. (1998), l'hypothèse est faite que la teneur en eau du sol ne dépasse jamais la capacité au champ, ici fixée à pF 2.5. Si, suite à un événement pluvieux ou un épisode d'irrigation, la teneur en eau du sol était amenée à dépasser sa valeur à capacité au champ, l'excès est considéré comme immédiatement drainé, constituant ainsi la valeur de Q_t. Lorsque la teneur en eau du sol est inférieure à la capacité au champ, Q_t est supposé égal à 0. Le modèle est exécuté en boucle en réintroduisant la valeur de stock finale comme valeur initiale pour l'itération suivante. Lorsque la différence entre le stock initial et le stock final est inférieure à 1 mm (ou que 20 itérations ont été effectuées), l'itération est arrêtée. L'efficience de l'irrigation η est alors calculée à l'échelle parcellaire en utilisant l'équation 5 au pas de temps hebdomadaire (qui n'est autre que l'équation 1 réécrite en faisant l'hypothèse que $NIWR=\Sigma(ET_s-P_s)$) calculée sur une année complète.

$$\eta = 100\frac{\sum(ET_s - P_s)}{\sum I_s} \quad \textbf{(5)}$$

avec ET_s l'évapotranspiration [mm/semaine], P_s les précipitations [mm/semaine] et I_s l'irrigation [mm/semaine] calculés à partir des valeurs quotidiennes. L'effet d'usage $e_u(M)$ à l'échelle parcellaire peut alors être calculé à partir de l'équation 3 en utilisant la valeur de η obtenue par l'équation 5 et une valeur d'efficience technique de référence. Dans notre cas, les valeurs de référence utilisées sont obtenues en calculant la médiane des gammes de valeurs de référence données par Tiercelin (2006). Ces valeurs d'effet d'usage peuvent alors être utilisées pour remplir nos objectifs. Précisons que, dans cette définition, l'effet d'usage e_u représente la gestion du système d'irrigation par l'agriculteur, au sens large. L'utilisation d'une valeur standard d'efficience technique η_t pour les deux techniques

d'irrigation renvoie en effet dans le facteur e_u l'ensemble des effets de la gestion quotidienne, aussi bien les décisions liées aux pratiques d'irrigation (quand irriguer, en quelle quantité…) que celles liées aux autres aspects de gestion de l'irrigation, comme la qualité et la fréquence d'entretien du système, etc.

En ce sens, l'effet d'usage e_u peut prendre des valeurs supérieures à 100%, pourvu que le produit η_t* e_u (c'est-à-dire l'efficience globale de l'irrigation η) reste inférieur à 100%. Des valeurs de e_u supérieures à 100% indiquent simplement que, grâce à une gestion appropriée, l'agriculteur obtient des valeurs d'efficience de l'irrigation η supérieures à l'efficience technique moyenne η_t propre à la technique d'irrigation qu'il utilise.

Enfin, pour chaque parcelle, l'évapotranspiration relative est déterminée sur une base annuelle. Cet indicateur est calculé en utilisant la relation $\Sigma[(K_{cb_t}+K_{e_t})ET_{0_t}]/\Sigma[(K_{cb_t}.K_{s_t}+K_{e_t})ET_{0_t}]$. Il représente ainsi le rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle et est utilisé comme indicateur de la qualité agronomique de l'irrigation. Une valeur proche de 1 indique ainsi un niveau de stress hydrique faible, et donc une gestion adéquate sur le plan agronomique, tandis qu'une valeur plus faible indique la présence de stress hydrique plus fréquent.

Résultats

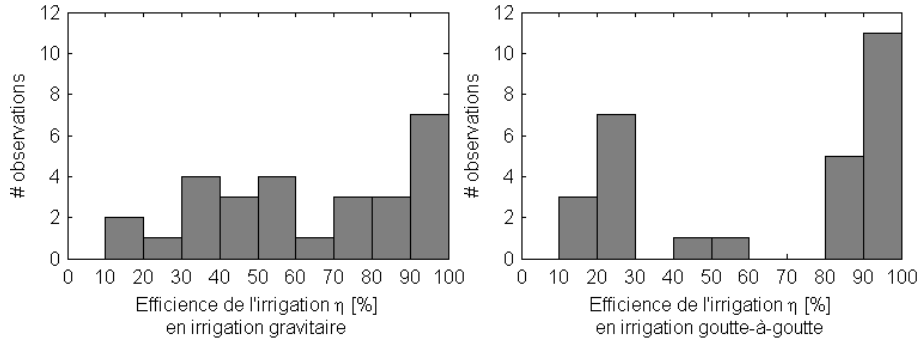
Efficience de l'irrigation η

Les valeurs de référence d'efficience de l'irrigation η trouvées dans la littérature varient dans une gamme de valeur plus ou moins étroite en fonction du type d'irrigation pratiqué (tableau 6). Les deux techniques utilisées dans notre zone d'étude ont ainsi des valeurs de référence qui vont de 40 à 75% pour l'irrigation gravitaire et de 70 à 95% pour l'irrigation goutte-à-goutte. L'efficience calculée sur la base du bilan hydrique s'avère être bien plus variable. Elles varient ainsi de 17 à 100% pour l'irrigation gravitaire et de 12 à 100% pour l'irrigation goutte-à-goutte (figure 18).

Tableau 6 : Valeurs de référence pour l'efficience d'application η_a (adapté de Tiercelin (2006) p.267).

Technique d'application	Efficience [%]
Irrigation gravitaire traditionnelle	40-75
Irrigation gravitaire traditionnelle (riz)	25-50
Irrigation gravitaire moderne	65-90
Asperseurs	55-85
Irrigation localisée	70-95

En irrigation gravitaire, les efficiences d'irrigation η se trouvant dans la gamme de variation généralement considérée pour l'efficience d'application e_a ne représentent que 11 parcelles sur 28, soit 39% des parcelles étudiées. En goutte-à-goutte, seules 5 parcelles sur les 28 se trouvent dans cette gamme, soit moins de 20%. Ces chiffres illustrent à quel point les efficiences mesurées dans la plaine des Triffa sont variables et combien l'utilisation de ces valeurs de référence comme indicateurs de l'utilisation de l'eau est approximative. Comme attendu, la technique d'irrigation n'explique donc, au mieux, qu'une partie de la variabilité de l'efficience de l'irrigation.



(a) (b)

Figure 18 : Histogrammes de l'efficience de l'irrigation η mesurée pour l'irrigation gravitaire (a) et goutte-à-goutte (b).

Notons que des valeurs d'efficience de l'irrigation η élevées indiquent certes de très faibles pertes en eau mais n'impliquent pas automatiquement une gestion agronomique optimale. Ces valeurs élevées se traduisent en effet souvent par des valeurs d'évapotranspiration relative, définie comme le rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle (ET_{pot} l'évapotranspiration des cultures si aucune limitation d'eau ne leur est

imposée), assez faibles (figure 19). Ces faibles valeurs indiquent un stress hydrique sévère pour les cultures concernées.

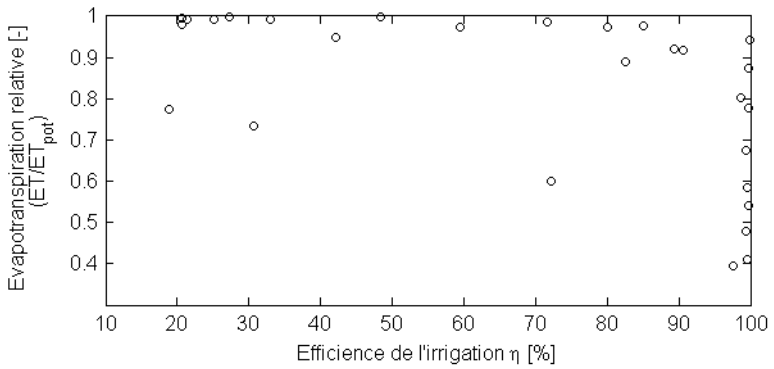
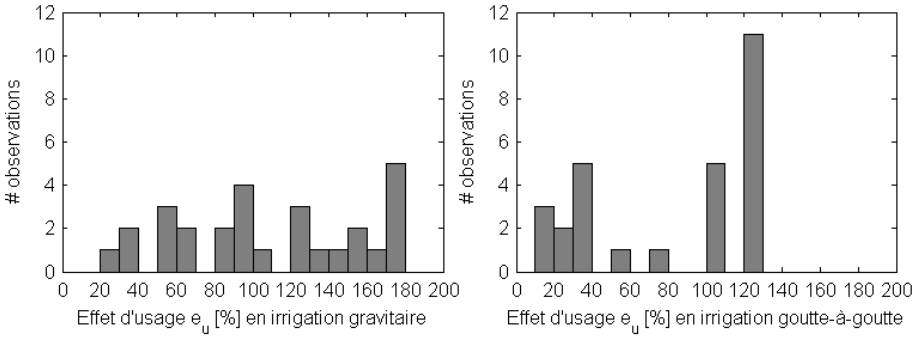


Figure 19 : Relation entre l'efficience de l'irrigation η et l'évapotranspiration relative. Lorsque η est maximale, l'évapotranspiration relative peut prendre des valeurs très faibles, indiquant un stress hydrique sévère pour les cultures concernées.

Effet d'usage e_u

Les valeurs d'effet d'usage e_u mesurées pour les parcelles étudiées sont très variables, plus encore que les valeurs d'efficience (figure 20). Elles s'échelonnent en effet de 29 à 174% pour l'irrigation gravitaire et de 15 à 121% pour l'irrigation goutte-à-goutte. Ces chiffres appellent deux remarques.

Tout d'abord, comme expliqué précédemment, les valeurs supérieures à 100% ne posent aucun problème : elles signifient simplement que l'agriculteur, par son usage ou sa gestion, parvient à obtenir une efficience de l'irrigation η supérieure à l'efficience technique η_t moyenne de la technique d'application qui est en place sur sa parcelle. Ces efficiences techniques moyennes étant plus faibles en irrigation gravitaire, il n'est pas étonnant de constater que les effets d'usage observés en irrigation gravitaire sont potentiellement supérieurs à ceux observés en irrigation goutte-à-goutte.



(a) (b)

Figure 20 : Histogrammes de l'effet d'usage e_u mesuré pour l'irrigation gravitaire (a) et goutte-à-goutte (b).

Ensuite, la variabilité de ces effets d'usage e_u est supérieure à la variabilité de l'efficience de l'irrigation η. Cela est mathématiquement évident mais illustre une fois de plus, si nécessaire, la variabilité des pratiques observées dans la zone d'étude.

Etude de la variabilité

Comme précisé en introduction de ce chapitre, l'un de ses objectifs consiste à étudier la mesure dans laquelle les pratiques à l'échelle de la parcelle se traduisent en termes de pression sur les ressources en eau à l'échelle globale. Pour ce faire, il sera nécessaire d'extrapoler les résultats d'efficience de l'irrigation, et donc d'effet d'usage, à l'ensemble des agriculteurs de la zone d'étude. Afin de rendre cette étape possible, la variabilité de l'effet d'usage va ici être analysée au regard de différents facteurs disponibles pour l'ensemble de parcelles de la zone d'étude. Comme présenté au chapitre 2, ces facteurs concernent essentiellement le type d'irrigation, les cultures pratiquées et les superficies cultivées.

Le premier facteur envisagé pour appréhender la variabilité de l'efficience et de l'effet d'usage est le type d'irrigation. Visuellement, il semble que la technique seule ne permette d'expliquer ni la variabilité de l'efficience de l'irrigation η ni celle de l'effet d'usage e_u (figures 18 et 20). Si cette observation est confirmée par les analyses de la variance pour l'efficience de l'irrigation, dont les résultats indiquent une absence totale de signifiance statistique, il n'en va pas de même pour l'effet d'usage, pour lequel la

technique d'application semble déterminante (tableau 7). Ceci indiquerait donc que l'usage diffère sensiblement selon le type d'irrigation pratiqué.

Tableau 7 : Moyennes et écarts types des efficiences et effets d'usage mesurés pour les deux techniques d'application. La p_{value} est le résultat d'une analyse de la variance à un facteur (une p_{value} supérieure à 0.1 indique l'absence de signifiance statistique, une valeur comprise entre 0.1 et 0.05 indique une signifiance statistique faible, une valeur comprise entre 0.05 et 0.01 indique une signifiance statistique élevée et une valeur inférieure à 0.01 indique une signifiance statistique très élevée (Wasserman 2004)).

	Moyenne ± écart type [%]		**p_{value}**
	Irrigation gravitaire	Irrigation goutte-à-goutte	
Efficience de l'irrigation (η)	62.9 ± 27.9	65.6 ± 36.1	0.752
Effet d'usage (e_u)	109.3 ± 48.5	79.5 ± 43.8	0.019

Le deuxième facteur disponible pour l'ensemble des parcelles de la zone d'étude est le type de culture. Une classification par type de culture uniquement ne semble pas plus significative que par type d'irrigation, avec une p_{value} de 0.839 pour η et de 0.151 pour e_u. Une classification croisée '*technique d'application* x *type de culture*' n'est pas meilleure, avec une p_{value} de 0.884 pour η et de 0.172 pour e_u. Après avoir testé l'ensemble des combinaisons '*technique d'application x culture*' pour différents regroupements de cultures, il apparait qu'une combinaison intéressante est une classification en trois groupes : un premier groupe comprend toutes les cultures irriguées en irrigation goutte-à-goutte, un deuxième les cultures d'agrumes et de maraichage irriguées par voie gravitaire, un troisième les cultures de céréales et les cultures de nèfles (tableau 8). Le principal facteur influençant l'effet d'usage semble donc être la technique d'irrigation. Néanmoins, la pertinence de la classification en trois groupes par rapport à l'effet d'usage est statistiquement très proche de la classification par type d'irrigation. Une telle classification permet par ailleurs d'affiner l'analyse.

Tableau 8 : Moyennes et écarts types des efficiences et effets d'usage mesurés pour les trois groupes identifiés. La p_{value} est le résultat d'une analyse de la variance à un facteur (une p_{value} supérieure à 0.1 indique l'absence de signifiance statistique, une valeur comprise entre 0.1 et 0.05 indique une signifiance statistique faible, une valeur comprise entre 0.05 et 0.01 indique une signifiance statistique élevée et une valeur inférieure à 0.01 indique une signifiance statistique très élevée (Wasserman 2004)).

	Moyenne ± écart type [%]			p_{value}
	Goutte-à-goutte (n=28)	Agrumes irr. gravitaire (n=19)	Céréales et nèfles (n=9)	
Efficience de l'irrigation (η)	65.6 ± 36.1	58.0 ± 25.4	73.1 ± 31.4	0.488
Effet d'usage (e_u)	79.5 ± 43.8	100.9 ± 44.3	127.2 ± 54.7	0.025

Les figures 21 et 22 illustrent la variabilité de η et e_u au sein de ces groupes. Cette variabilité est maximale pour les cultures irriguées au goutte-à-goutte et pour les céréales et les nèfles ; elle est moindre pour les agrumes et les cultures maraichères irrigués par voie gravitaire, avec quelques exceptions toutefois.

Enfin, notons également qu'une série de parcelles ne rentrent en théorie pas dans cette classification. La question de la classification des céréales et des nèfles irrigués au goutte-à-goutte poserait en effet problème. En pratique, les céréales ne sont jamais irriguées au goutte-à-goutte. Quant aux néfliers, aucun cas de ces arbres irrigués au goutte-à-goutte dans notre zone d'étude ne nous a été ramené ; en croisant les données du recensement réalisé en 2012 et les données de l'ORMVAM sur le type d'irrigation, cela pourrait toutefois être le cas de 22.4 ha de « cultures arboricoles diverses », soit moins de 1% des superficies cultivées. Ce cas ne pose donc pas de problème.

Le cas des parcelles de cultures maraichères, betteraves et pommes de terre irriguées par voie gravitaire doit également être abordé. Seules deux de ces parcelles se trouvent dans l'échantillon traité, ce qui pourrait poser problème sur le plan statistique. Ceci est lié à la faible taille de notre échantillon. En 2012, 12.6% des agriculteurs de la zone d'étude cultivaient en effet des pommes de terre, betteraves ou cultures maraichères en irrigation gravitaire et c'est le cas de 8% des agriculteurs de notre échantillon. Sa représentativité est donc, de ce point de vue, acceptable. Ces deux parcelles seront donc écartées de la suite de l'analyse (ce qui rend par ailleurs la classification en trois groupes plus pertinente encore, avec une p_{value} de 0.021 contre 0.025 lorsqu'elles s'y trouvent).

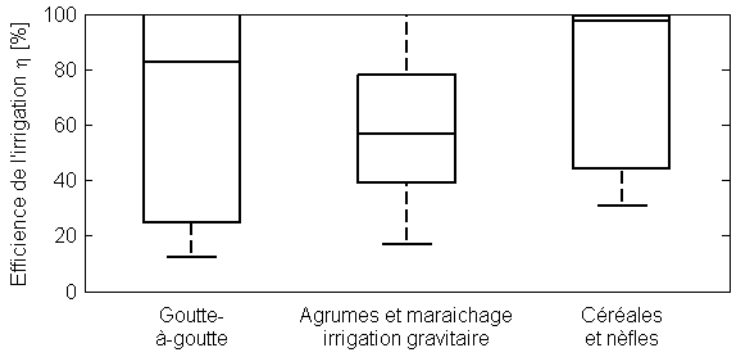


Figure 21 : Variabilité de l'efficience de l'irrigation η au sein des 3 groupes identifiés comme les plus pertinents.

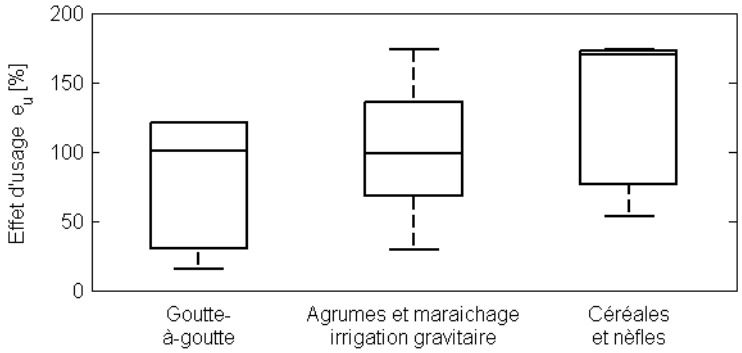


Figure 22 : Variabilité de l'effet d'usage e_u au sein des 3 groupes identifiés comme les plus pertinents.

La suite de cette section est dédiée à l'étude plus approfondie des groupes 1 et 2, soit les cultures irriguées en goutte-à-goutte et les cultures d'agrumes irriguées par voie gravitaire. L'attention est portée à ces deux groupes pour deux raisons. Premièrement, ce sont les groupes qui présentent les valeurs d'efficience les plus faibles et qui sont donc *a priori* les plus gros consommateurs d'eau. Mais ce sont surtout les deux groupes les plus représentés au sein de notre zone d'étude, et c'est là la seconde raison de ce choix. Les parcelles irriguées en goutte-à-goutte représentaient en effet, en 2012, 28.0% des superficies cultivées et les parcelles d'agrumes irriguées par voie gravitaire 49.3% contre 8.3% pour les céréales, 4.9% pour les nèfles et autres cultures arboricoles diverses et 9.5% pour les pommes de terre, betteraves et autres cultures maraichères irriguées par voie gravitaire.

Les parcelles irriguées au goutte-à-goutte ont une efficience de l'irrigation η très variable, allant de 12 à 100%. L'effet d'usage e_u de ces parcelles varie, quant à lui, de 15 à 121%. Le troisième facteur disponible pour l'ensemble des parcelles de la zone d'étude, la taille des exploitations, montre une corrélation avec cet effet d'usage (figure 23). Cette corrélation, malgré un coefficient de détermination r^2 assez faible, suggère que les grosses exploitations ont un effet d'usage plus important que les petites exploitations.

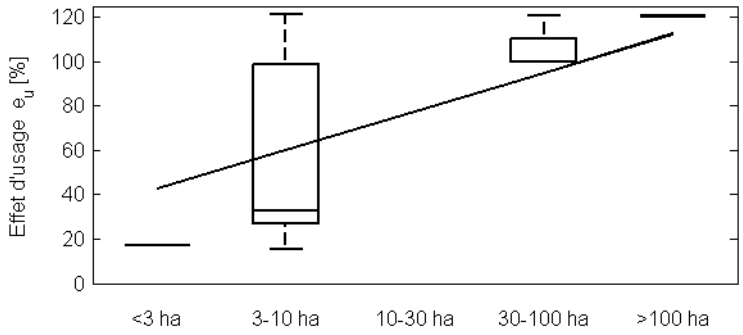


Figure 23 : Relation entre la taille de l'exploitation et l'effet d'usage η_u pour les parcelles irriguées au goutte-à-goutte. Les boxplots représentent la distribution des différentes classes de taille (échelle logarithmique) et la ligne représente la régression logarithmique dont l'équation est $e_u=34.8826.log_{10}(taille)+31.5012$ avec e_u en % et la *taille* en ha ($r^2=0.51$).

Les parcelles d'agrumes irriguées par voie gravitaire présentent également une variabilité assez importante, avec des efficiences de l'irrigation allant de 17 à 100% et des effets d'usage allant de 29 à 173%. Aucune corrélation ne semble ici lier cet effet à la taille des exploitations (figure 24). La corrélation la plus probante qui a pu être mise en évidence est une relation avec le rapport entre la superficie effectivement plantée avec des agrumes et la taille officielle de l'exploitation, appelé « proportion d'agrumes » (figure 25). Cette proportion d'agrumes peut facilement être calculée pour l'ensemble des exploitations de la zone d'étude à partir des superficies des différentes parcelles irriguées et de la taille officielle des exploitations. Ainsi, et malgré un coefficient de détermination r^2 assez faible (0.43), il semblerait que l'effet d'usage e_u observé augmente lorsque ce rapport augmente. Notons que l'utilisation de la « proportion d'agrumes » n'a de sens que si les parcelles sont plantées avec des agrumes et que l'exclusion des deux parcelles de

maraichage de ce groupe est donc irrévocable (même si, dans le cas contraire, le coefficient de détermination r^2 serait à peine moindre (0.36) et la relation resterait statistiquement pertinente).

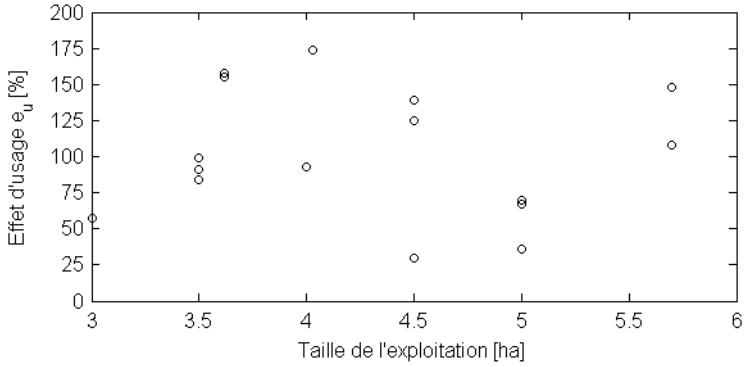


Figure 24 : Relation entre l'effet d'usage e_u et la taille de l'exploitation pour les parcelles d'agrumes irriguées par voie gravitaire.

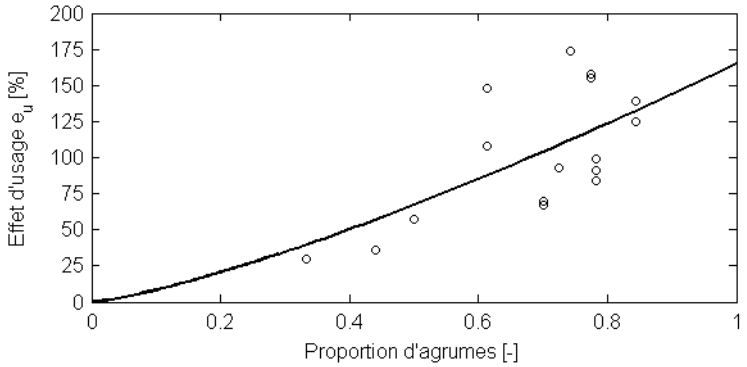


Figure 25 : Relation entre l'effet d'usage e_u et le rapport entre la superficie plantée avec des agrumes et la taille officielle de l'exploitation (ici appelé « proportion d'agrumes ») pour les parcelles d'agrumes irriguées par voie gravitaire. Les points représentent les observations et la courbe représente la régression par l'équation $e_u=164.9789.propag^{1.2943}$ avec e_u en % et *propag* la proportion d'agrumes [-] (r^2=0.43).

Discussion

Efficience de l'irrigation η et effet d'usage e_u

L'efficience de l'irrigation η varie dans une gamme de valeurs beaucoup plus large que l'efficience d'application e_a telle que renseignée dans les ouvrages de référence. Les aspects techniques seuls ne suffisent donc pas à expliquer les valeurs d'efficience de l'irrigation η réellement observée sur le terrain. Ceci tend à valider notre formulation selon laquelle l'usage doit être intégré dans le calcul de l'efficience de l'irrigation. La formulation mathématique proposée (équation 3) permet d'isoler les aspects techniques (η_t, qui peut être assimilé à l'efficience d'application e_a lorsque le calcul est réalisé à l'échelle de la parcelle) des « autres » aspects, regroupés sous le vocable d'effet d'usage e_u. Comme intuitivement attendu, l'effet d'usage varie dans une gamme plus large encore, ce qui s'explique par la variabilité socio-économique des exploitations présentes dans la zone d'étude.

Les valeurs moyennes d'effet d'usage e_u pour l'irrigation gravitaire (109%) sont supérieures à 100% tandis que celles observées pour l'irrigation goutte-à-goutte (79%) sont inférieures à ce seuil (tableau 7). Cela signifie que, en moyenne, les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire obtiennent des valeurs d'efficience η supérieures à l'efficience technique moyenne η_t ; leur usage peut donc être qualifié d'adéquat. A l'inverse, les effets d'usage e_u inférieurs à 100% observés en irrigation goutte-à-goutte indiquent que les agriculteurs pratiquant ce type d'irrigation obtiennent des valeurs d'efficience η inférieures à l'efficience technique moyenne et que leur usage pourrait donc être amélioré. Sur cette base, il peut donc être affirmé que, en moyenne, les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire en font un usage adéquat tandis que l'inverse est vrai chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte.

L'étude plus approfondie de cet effet d'usage e_u est réalisée au regard des données disponibles pour l'ensemble des exploitations de la zone d'étude, à savoir la technique d'irrigation, le type de culture et les superficies des différentes parcelles irriguées. Cette analyse montre que le principal facteur influençant l'effet d'usage e_u est la technique d'irrigation. Elle a également permis de classer les parcelles en trois groupes statistiquement différents.

Le premier groupe, les parcelles irriguées grâce à la technologie goutte-à-goutte, montre des valeurs d'effet d'usage e_u très variées. Ce groupe inclus à la fois des cultures très variées et des profils de ferme très variés. Une corrélation entre la taille de l'exploitation et cet effet a d'ailleurs été mise en évidence, ce qui pousse à considérer que la taille de l'exploitation est un

indicateur valable de l'effet d'usage. L'interprétation selon laquelle l'usage est lié à la taille de l'exploitation, avec un mode de gestion plus artisanal, intuitif, pour les petites exploitations et un mode de gestion plus rationnel semble à première vue cohérent. Le lien avec les valeurs d'effet d'usage e_u est alors direct, la technique du goutte-à-goutte requérant un mode de gestion rationnel et résolument peu intuitif.

Ce lien entre efficience et taille de l'exploitation est très peu documenté dans la littérature. Dans leur publication, Bos and Nugteren (1990) et Greyling (2010) abordent explicitement cet aspect, le premier pour constater l'absence de relation entre ces facteurs et le second pour relever une relation inverse entre taille et efficience. Bien que cela ne soit pas explicitement spécifié, ces deux documents semblent toutefois traiter d'exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire et la problématique est donc fondamentalement différente de celle traitée ici. A l'inverse, Skaggs and Samani (2005) observent une relation significative et directe entre taille de l'exploitation et efficience. Cette étude n'intègre pas les aspects techniques et inclut donc des exploitations pratiquant des techniques d'application différentes. Leurs conclusions corroborent toutefois en partie nos résultats puisqu'ils spécifient que, si un biais existe quant à la technique d'irrigation, probablement plus « technologique » dans les grandes exploitations, la principale explication quant à cette différence d'efficience réside dans le mode de gestion, qui varie très fortement en fonction de la taille des exploitations. Nos résultats et interprétations, bien que ne trouvant que peu d'échos dans la littérature scientifique, ne semblent donc pas contradictoires avec les observations rapportées.

Le deuxième groupe identifié concerne les parcelles d'agrumes et de maraichage irriguées par voie gravitaire. La relation la plus probante mise en évidence par rapport à l'effet d'usage, une corrélation avec le rapport entre la superficie plantée avec des agrumes et la taille officielle de l'exploitation (que nous appellerons « proportion d'agrumes » dans la suite de ce travail), est ici inédite. Cette relation s'explique toutefois par des raisons purement contextuelles et n'est donc pas dénuée de sens, à condition d'exclure de ce groupe les parcelles de maraichage, au nombre de 2 contre 17 parcelles d'agrumes.

Dans la zone étudiée, les calculs d'attribution des volumes d'eau d'irrigation par tour d'eau pour les agriculteurs sont effectués par l'administration sur la base de la superficie officielle de l'exploitation, en faisant l'hypothèse que la culture en place est une plantation d'agrumes. Cela engendre deux effets. Tout d'abord, les superficies non-exploitées par l'agriculture mais

inclues dans ce calcul (chemins, bâtiments de ferme…) réduisent la surface effectivement irriguée et leur présence participe donc à augmenter les volumes appliqués par superficie cultivée, ce qui diminue les valeurs d'efficience observées. Ensuite, le calcul étant réalisé sous l'hypothèse que les cultures en place sont des cultures d'agrumes, plusieurs agriculteurs considèrent que l'eau attribuée est à destination des agrumes ; si d'autres cultures sont cultivées sur l'exploitation, l'eau attribuée n'est généralement utilisée que sur les surfaces plantées en agrumes, ce qui a une fois encore pour effet d'augmenter les volumes appliqués par unité de surface et donc de diminuer l'efficience observée. Notons enfin que, lorsque les agriculteurs utilisent l'eau de la nappe pour réaliser des événements d'irrigation supplémentaires, ils ajustent généralement les volumes appliqués sur la base de ceux reçus par tour d'eau planifié et les effets décrits ci-dessus se voient ainsi encore renforcés.

Le troisième groupe reprend les cultures de céréales et de nèfles. L'irrigation des céréales se fait toujours par voie gravitaire, l'irrigation goutte-à-goutte n'étant absolument pas adaptée aux céréales. Malgré les observations réalisées sur la base de la figure 22, c'est parmi les céréales que l'on retrouve les valeurs d'effet d'usage les plus élevées, avec plus de la moitié des parcelles présentant des valeurs proches de 170% pour une moyenne de 125%. Les céréales sont en effet très peu irriguées dans la zone étudiée, seuls un ou deux épisodes d'irrigation par an étant parfois pratiqués, généralement associés à de petits volumes d'eau. Les valeurs d'évapotranspiration relative y sont d'ailleurs assez faibles, de 63% en moyenne. Ceci s'explique par le fait que les céréales sont là une culture de subsistance à destination de la consommation privée, rarement revendue. Les rendements en céréales sont donc vus comme moins prioritaires et cette culture représente donc, à l'échelle de la zone d'étude, un tout petit pourcentage de la consommation totale d'eau d'irrigation. L'effet d'usage e_u y est dès lors très élevé.

La seconde culture de ce groupe est la culture de nèfles. L'irrigation y est exclusivement gravitaire et les valeurs d'effet d'usage observé y sont assez élevées (130% en moyenne). Dans la zone d'étude, cette culture est systématiquement observée dans de toutes petites exploitations et les fruits sont toujours vendus sur le marché local, les nèfles réagissant très mal aux chocs inévitablement associés au transport. Les seuls exploitants rencontrés dans la zone d'étude ne disposant pas de puits pour l'irrigation pratiquent par ailleurs cette culture ; seule l'eau de distribution gérée par l'administration est donc appliquée sur leur exploitation. Cela limite dès lors les quantités appliquées et se traduit par un effet d'usage η_u assez élevé, la gestion du

timing et des quantités étant *de facto* de la responsabilité des gestionnaires du réseau d'irrigation centralisé. L'évapotranspiration relative moyenne (80%) y est d'ailleurs nettement plus élevée que pour les cultures de céréales pour une valeur d'effet d'usage moyen pourtant légèrement supérieur (130%), illustrant la meilleure gestion dont ces cultures font l'objet.

Effet d'usage et gestion de l'agriculteur

A la lecture de l'analyse qui vient d'être faite, plusieurs conclusions peuvent être tirées. Tout d'abord, les principaux facteurs corrélés à l'effet d'usage e_u mesuré sur les parcelles, qu'il s'agisse de la technique d'irrigation – généralement la même sur toutes les parcelles d'une exploitation –, de la taille de l'exploitation, de la proportion d'agrumes voire même de la présence de cultures de nèfles qui, comme nous venons de l'expliquer, indique une typologie d'exploitation très spécifique, sont propres à l'exploitation et non à la parcelle. Les valeurs d'effet d'usage e_u seraient donc principalement déterminées au niveau des exploitations. La seule exception concerne les cultures de céréales, qui ont un statut particulier dans la zone d'étude, ce qui ne déforce donc pas cette interprétation. La variabilité des valeurs d'effet d'usage e_u observées au sein de la zone d'étude serait donc à mettre en lien avec la variabilité des caractéristiques des exploitations qui s'y retrouvent.

La deuxième conclusion qui peut être tirée de cette analyse est que l'effet d'usage e_u est lié à la gestion de l'exploitant. La particularité du niveau « exploitation » réside avant tout dans son mode de gestion. En d'autres mots, cela signifie que le mode de gestion est à la fois la caractéristique commune sur l'ensemble d'une l'exploitation et ce qui la distingue des autres. Partant du constat que l'effet d'usage e_u est déterminé au niveau de l'exploitation, il est donc inévitable de déduire que le mode de gestion – qui se traduit en pratique par une logique d'action menant à ce que nous appellerons *gestion* (*M*) – est ainsi le principal facteur explicatif de l'effet d'usage e_u mesuré. Les facteurs explicatifs identifiés plus haut (taille de l'exploitation, technique d'application de l'irrigation, proportion d'agrumes…) seraient alors de simples indicateurs de cette gestion. L'effet d'usage dépendrait donc de la gestion, ce qui se traduit mathématiquement en reformulant l'effet d'usage $e_u(M)$, *M* étant la variable *gestion*.

Enfin, la troisième et dernière conclusion de cette section vient de l'analyse de la relation entre efficience d'usage et comportement. Si l'on s'accorde sur la formulation $e_u(M)$ qui vient d'être proposée pour l'effet d'usage, il convient d'interpréter les résultats ici obtenus à la lecture de cette

formulation. Ainsi, il semble que la gestion *M* ne soit pas indépendante du type d'irrigation. Si l'on admet que les facteurs explicatifs identifiés plus haut (taille de l'exploitation, technique d'application de l'irrigation, proportion d'agrumes…) sont des indicateurs de cette gestion, on constate, par exemple, que toutes les exploitations de notre échantillon dont la taille est supérieure à 6 ha pratiquent l'irrigation goutte-à-goutte. Bien que moins tranchée, cette observation reste valable au niveau de la zone d'étude. La taille moyenne des exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire est de 5.5 ha et leur écart type de 15.6 ha tandis que, en goutte-à-goutte, la taille moyenne est de 12.2 ha pour un écart type de 18.1 ha. L'analyse de la variance de la taille de l'exploitation par rapport au type d'irrigation confirme que les tailles d'exploitation diffèrent très significativement selon le type d'irrigation pour l'ensemble de la zone d'étude (la p_{value} de cette ANOVA est de 0.0004).

De même, la relation entre la gestion *M* et l'effet d'usage semble différer selon la technique d'irrigation, comme l'indique la corrélation observée entre l'effet d'usage des parcelles en goutte-à-goutte et la taille de la ferme ainsi que l'absence de cette même corrélation pour les parcelles irriguées par voie gravitaire. Dans la formulation de l'effet d'usage $e_u(M)$, ni la fonction d'effet d'usage e_u ni la variable *gestion M* ne sont donc indépendantes de la technologie d'irrigation. Cette réflexion sera explicitement développée dans la suite de ce chapitre.

Conclusion

L'utilisation de l'efficience d'irrigation η comme indicateur du bon fonctionnement d'un système d'irrigation est courante mais semble loin d'être triviale. La multiplication des campagnes de promotion de technologies réputées « efficientes », basées sur cette hypothèse et ayant pour but de diminuer la consommation d'eau agricole, mérite donc d'être analysée. La technique d'application influence l'efficience de l'irrigation mais d'autres facteurs entrent en effet en compte pour déterminer l'efficience de l'irrigation η effectivement observée. En particulier, la gestion de l'irrigation – l'usage qui est effectivement fait d'une technique particulière – a sans doute autant d'influence que la technique d'application à proprement parler. L'intégration de cette notion d'usage dans le calcul de l'efficience est donc nécessaire pour que celle-ci soit correctement appréhendée.

Les efficiences d'application e_a renseignées dans les ouvrages de référence vont de 40 à 75% pour l'irrigation gravitaire et de 70 à 95% pour l'irrigation

goutte-à-goutte (Tiercelin 2006). Les efficiences de l'irrigation η mesurées dans la plaine des Triffa montrent une variabilité beaucoup plus importante : de 17 à 100% en irrigation gravitaire et de 12 à 100% en irrigation goutte-à-goutte. L'efficience de l'irrigation ne diffère d'ailleurs pas significativement selon le type d'irrigation pratiqué (p_{value} de 0.752). L'utilisation de ces valeurs de référence comme indicateurs de l'utilisation de l'eau est donc plus qu'approximative. Les aspects techniques seuls ne suffisent en effet pas à expliquer les valeurs d'efficience de l'irrigation η réellement observée sur le terrain, ce qui valide la distinction entre efficience technique η_t et effet d'usage e_u, l'efficience globale étant le produit de ces deux facteurs.

La variabilité de ces effets d'usage e_u est supérieure à la variabilité de l'efficience de l'irrigation η. Cela illustre la variabilité des pratiques observées dans la zone d'étude. L'étude approfondie de cet effet d'usage e_u est réalisée au regard des caractéristiques disponibles pour l'ensemble des exploitations de la zone d'étude (type d'irrigation, cultures pratiquées, taille des parcelles). Elle montre que le principal facteur influençant sa valeur est la technique d'irrigation. Les valeurs moyennes, supérieures à 100% pour l'irrigation gravitaire (109%) et inférieures à 100% pour l'irrigation goutte-à-goutte (79%), indiquent par ailleurs que les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire en font un usage adéquat tandis que l'inverse est vrai chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte.

Sur la base de cet effet d'usage, les parcelles étudiées ont ensuite pu être classées en trois groupes. Le premier rassemble les parcelles irriguées en irrigation goutte-à-goutte, le deuxième les parcelles d'agrumes irriguées par voie gravitaire et le troisième les parcelles de céréales et de nèfles.

Pour les parcelles irriguées en irrigation goutte-à-goutte, l'effet d'usage est très variable, allant de 15 à 121%. Il est par ailleurs positivement corrélé à la taille de l'exploitation, suggérant que les petites exploitations sont gérées de manière plus intuitive tandis que les grosses exploitations sont gérées de manière plus rationnelle. L'effet d'usage des parcelles d'agrumes irriguées par voie gravitaire est également très variable, de 29 à 173%. Il ne présente pas de corrélation avec la taille de l'exploitation mais est par contre corrélé au rapport entre la superficie effectivement plantée avec des agrumes et la taille officielle de l'exploitation. Cette observation trouve son explication dans le mode de calcul d'attribution des volumes d'eau d'irrigation par tour d'eau dans la zone d'étude. Les céréales sont généralement très peu irriguées et l'effet d'usage y est donc généralement élevé, 125% en moyenne, et l'évapotranspiration relative particulièrement faible (63% en moyenne). Enfin, les cultures de nèfles montrent elles-aussi des effets d'usage élevés

(130% en moyenne), valeurs mises en lien avec l'absence d'accès à l'eau de la nappe pour plusieurs de ces agriculteurs, ce qui limite les quantités d'eau d'irrigation appliquées.

La plupart des facteurs corrélés à l'effet d'usage sont donc propres à l'exploitation et la variabilité des valeurs d'effet d'usage e_u observées au sein de la zone d'étude est donc à mettre en lien avec la variabilité des caractéristiques des exploitations qui s'y retrouvent. La logique d'action qui peut aussi être appelée « gestion », est ainsi le principal facteur explicatif de l'effet d'usage e_u mesuré. Les facteurs explicatifs identifiés précédemment - la technique d'irrigation, la taille de l'exploitation, la proportion d'agrumes - peuvent être considérés comme des indicateurs de cette gestion. L'effet d'usage dépend donc de la gestion, justifiant sa formulation en $e_u(M)$, M étant la variable *gestion*. Cette gestion n'est pas indépendante du type d'irrigation et ces deux facteurs sont donc endogènes et un traitement particulier est donc requis.

Cette section a donc permis de mettre en lumière la notion d'*effet d'usage* et de justifier sa prise en compte dans le calcul de l'efficience globale. Cet effet d'usage dépend du comportement de l'agriculteur, ce qui justifie sa formulation en $e_u(M)$. La gestion de l'agriculteur et la technique d'irrigation étant endogènes, la manipulation de ces notions requiert un traitement statistique particulier, qui sera développé dans la suite de ce chapitre.

3.2 - Efficience de l'irrigation à l'échelle parcellaire : fonctions d'usage et technique d'irrigation

Introduction

Afin de réduire la consommation d'eau agricole, l'agriculteur, en tant qu'acteur de premier plan de la gestion de cette eau, fait l'objet d'une attention croissante. La démonstration de l'importance de la gestion à l'échelle de l'exploitation sur l'efficience de l'irrigation η qui vient d'être faite trouve ainsi un certain écho dans la littérature, en particulier chez des auteurs développant des approches de type économique.

Plusieurs d'entre eux développent une approche similaire. Un indicateur de performance de l'irrigation est d'abord calculé à l'échelle de l'exploitation, le plus souvent le *Water Efficiency* (*WE*). Cet indicateur, défini comme le rapport entre l'utilisation optimale d'eau d'irrigation et l'utilisation effective d'eau d'irrigation pour un niveau de production donné, est basé sur le concept d'*input specific technical efficiency* (Kaneko et al. 2004). Il a donc avant tout une signification économique (Wang 2010) dans la mesure où il intègre potentiellement le niveau de production, l'utilisation d'intrants divers, les décisions de gestion de l'agriculteur, etc. (Gadanakis et al. 2015).

Pour calculer l'utilisation optimale d'eau d'irrigation, deux méthodes peuvent être utilisées. La première, la *Stochastic Frontier Analysis* (*SFA*), est une technique paramétrique. Elle consiste à représenter les taux de production effectifs d'un grand nombre d'agents en fonction des intrants utilisés, eau d'irrigation mais aussi engrais, main d'œuvre, etc. Cette représentation permet de définir, de manière empirique, une « frontière de production », soit le niveau de production optimal pour un niveau d'utilisation d'intrants donné. En inversant cette relation, la quantité optimale d'eau d'irrigation peut être obtenue pour un niveau de production et d'utilisation d'intrants donné. Cette quantité optimale est alors comparée à la quantité d'eau effectivement utilisée pour obtenir la valeur de *WE*. La seconde méthode, la *Data Envelopment Analysis* (*DEA*), est similaire à la première mais est non-paramétrique. La relation entre production et utilisation d'eau est représentée pour un grand nombre d'agents et la « frontière de production » est alors déterminée uniquement sur base de l'utilisation de l'eau. Tout comme pour la méthode précédente, cette relation

est alors inversée, l'utilisation optimale d'eau définie pour un niveau de production donné et comparée à son utilisation effective pour calculer la valeur de *WE*.

Les valeurs de *WE* ainsi obtenues sont ensuite confrontées à diverses caractéristiques des exploitations. La plupart des auteurs utilisent, pour ce faire, une régression *Tobit*, qui est une forme bornée de régression linéaire, c'est-à-dire qu'elle est limitée à une valeur maximum et/ou minimum.

Les résultats obtenus par ces auteurs, bien qu'essentiellement descriptifs, permettent d'identifier plusieurs caractéristiques influençant l'efficience. Ainsi, analysant une série de petites exploitations pratiquant l'irrigation traditionnelle en Afrique du Sud, Speelman et al. (2008) mettent en évidence une corrélation positive entre le WE et l'accès à la propriété foncière et négative entre le WE et la taille de l'exploitation, soulignant toutefois que ce dernier constat est incohérent avec les rendements d'échelle croissants observés pour la plupart de ces exploitations. La technique d'irrigation aurait également une influence non-négligeable sur le WE. En Chine, sur de toutes petites exploitations, Wang (2010) observe une corrélation négative entre le WE et la taille de l'exploitation mais la signifiance statistique de cette observation est très mauvaise. Par contre, un droit d'accès exclusif à l'eau se traduirait par une nette augmentation du WE. Etudiant les cultures d'agrumes en Tunisie, Dhehibi et al. (2007) concluent quant à eux à une corrélation positive entre la taille de l'exploitation et le WE. S'intéressant aux cultures horticoles irriguées en Angleterre, Gadanakis et al. (2015) montrent que seule la technique d'application utilisée est significativement corrélée au WE. Enfin, travaillant sur les cultures horticoles hors-saison en Grèce, Karagiannis et al. (2003) n'observent pas d'effet de la taille de l'exploitation mais constatent une corrélation positive entre le *WE* et l'investissement technologique et négative avec le pourcentage de terres louées.

Il ressort de ces études que la relation entre la taille de l'exploitation et l'utilisation de l'eau d'irrigation est loin d'être triviale et mérite d'être approfondie. L'importance du type d'irrigation, lorsque cet aspect est explicitement abordé, est aussi rappelée. Enfin, les aspects fonciers semblent également jouer un rôle non-négligeable sur cette question.

Les méthodes de travail mises en place par ces auteurs appellent quelques commentaires. Tout d'abord, toutes ces études évaluent l'irrigation sur base du *WE*. La signification de cet indicateur pose question. Son calcul implique de passer soit par une fonction de production puisqu'il est basé sur une production théorique dépendant des intrants utilisés (lorsque la *SFA* est

appliquée) soit par une analyse statistique d'un très grand jeu de données en faisant alors une comparaison relative des agriculteurs entre eux (lorsque la *DEA* est appliquée). Dans tous les cas, cette approche intègre, implicitement ou explicitement, l'efficience d'utilisation d'intrants autres que l'eau. Si la pertinence économique de l'indicateur en est accrue (Wang 2010; Gadanakis et al. 2015), sa lisibilité et son utilité du point de vue de la consommation absolue d'eau d'irrigation en sont altérées. Dans le cadre de ce chapitre consacré à l'efficience de l'irrigation, l'utilisation de l'indicateur η est donc plus appropriée.

Une deuxième remarque concerne la méthode de calcul des indicateurs. Le calcul de la frontière de production par la *DEA* repose sur une base statistique uniquement et implique l'utilisation d'un très grand jeu de données. Lorsque la *SFA* est utilisée, une fonction de production paramétrique doit être utilisée. Outre la difficulté de calibrer une telle fonction, difficulté qui implique donc également l'utilisation d'un jeu de données reprenant de nombreuses variables (les intrants considérés) pour un grand nombre d'agriculteurs, l'application d'une telle fonction de production est très difficile à implémenter lorsqu'il s'agit de cultures fruitières et les paramètres seront inévitablement extrêmement contextuels, ce qui complique encore sa mise en place. Enfin, dans les deux cas, le *WE* calculé est alors une forme d'efficience relative, ne permettant que la comparaison d'exploitants entre eux. L'implémentation d'un bilan hydrique à l'échelle de la parcelle agricole permet quant à elle de calculer les indicateurs d'efficience sur base d'un nombre d'exploitations beaucoup plus restreint et permet une évaluation absolue de l'utilisation de l'eau. La fiabilité du calcul des flux, parfois critiquée (van Halsema and Vincent 2012), est ici garantie par la mise en place d'un bilan détaillé et par un calcul systématique de l'incertitude associée aux données. Cet aspect sera abordé dans le dernier chapitre de ce document.

Une dernière remarque concerne l'approche *Tobit* mise en place pour confronter les valeurs de *WE* avec les caractéristiques des exploitations. Si cette approche de régression est facile à implémenter et permet de traiter des données aussi bien discrètes que continues, elle suppose cependant que les variables explicatives soient indépendantes. Dans les exemples cités plus haut, l'utilisation de cette technique de régression revient donc à faire l'hypothèse que la taille de l'exploitation, la technique d'irrigation et le statut foncier sont des variables indépendantes. Si cette hypothèse semble raisonnable en ce qui concerne le statut foncier, voire la taille de

l'exploitation[11], l'hypothèse d'indépendance entre la technique d'irrigation et le *WE*, ou tout type d'efficience, n'est par contre pas tenable *a priori*.
Il semble en effet évident d'affirmer que le choix de la technique d'irrigation dépend en partie du mode de gestion de l'agriculteur. Inversement, le mode de gestion dépend du type d'irrigation. Il apparait dès lors que ces deux facteurs, mode de gestion et technique d'irrigation, sont statistiquement dépendants. L'influence directe du mode de gestion sur l'efficience de l'irrigation η fut soulignée précédemment. L'hypothèse selon laquelle l'efficience de l'irrigation η et le type d'irrigation sont indépendants n'est donc pas valide. Le même raisonnement peut être tenu quel que soit le type d'efficience considéré, *a fortiori* le *WE*.
La technique d'irrigation et l'efficience sont donc endogènes. Tout modèle statistique prétendant étudier des liens de causalité entre ces deux facteurs doit donc explicitement permettre la prise en compte de cette endogénéité. Dans le cas contraire, seules des corrélations peuvent être mises en évidence ; toute interprétation des résultats de tels modèles faisant appel à des notions de causalité serait alors erronée.
L'objectif de cette section est donc d'étudier, de manière approfondie, l'interdépendance entre l'usage et la technique d'irrigation. Il s'agira donc d'ajuster la fonction d'efficience d'usage décrite plus haut en fonction du type d'irrigation. Pour ce faire, une méthode robuste qui permette de traiter explicitement l'endogénéité entre ces deux facteurs sera utilisée. Les déterminants de l'efficience d'usage seront alors identifiés et quantifiés et l'hypothèse selon laquelle la fonction d'effet d'usage est elle-même fonction du type d'irrigation pourra être démontrée.

Méthodologie

Formulation mathématique

Comme ce fut démontré précédemment, l'efficience de l'irrigation η peut être représentée par le produit de l'efficience technique η_t et de l'effet d'usage $e_u(M)$, ce dernier étant une fonction de la gestion de l'agriculteur M (équation 3). L'hypothèse posée est que aussi bien la gestion de l'agriculteur M que la relation qui lie l'effet d'usage à la gestion $\eta_u(M)$ diffèrent en fonction du type d'irrigation.

[11] Une amélioration d'efficience peut se traduire par une augmentation de revenu, qui se traduit elle-même par une augmentation de la consommation qui se traduit enfin par une augmentation de la demande, notamment en surface irriguée. L'indépendance entre la taille de l'exploitation et l'efficience est donc loin d'être triviale.

Il convient donc d'abord de distinguer des usages différents selon la technique d'irrigation. Soit *Ti* la technique d'irrigation *i* (*i=1* pour l'irrigation gravitaire et *i=2* pour l'irrigation goutte-à-goutte), on distinguera donc la gestion de l'agriculteur M_{T1} lorsqu'il pratique l'irrigation gravitaire et M_{T2} lorsqu'il pratique l'irrigation goutte-à-goutte. Pour la relation liant l'efficience d'usage à la gestion de l'agriculteur, on distinguera donc l'effet d'usage $e_{u_T1}(M_{T1})$ lorsque l'agriculteur pratique l'irrigation gravitaire de l'effet d'usage $e_{u_T2}(M_{T2})$ lorsque l'agriculteur pratique l'irrigation goutte-à-goutte. L'efficience technique étant elle-aussi fonction de la technique d'irrigation, on obtient alors l'équation 6.

$$\eta = \begin{cases} \eta_{t_T1} \cdot e_{u_{T1}}(M_{T1}) & \text{pour l'irrigation gravitaire} \\ \eta_{t_T2} \cdot e_{u_{T2}}(M_{T2}) & \text{pour l'irrigation goutte-à-goutte} \end{cases} \quad \textbf{(6)}$$

L'objectif de cette section est donc de déterminer et de quantifier cette relation en caractérisant aussi bien la relation d'effet d'usage e_{u_Ti} que la gestion M_{Ti} en elle-même.

Collecte des données

Les données utilisées sont les mêmes que celles utilisées précédemment. Les valeurs d'efficience de l'irrigation η, d'effet d'usage e_u et d'efficience technique η_t ont été calculées selon la méthodologie décrite dans la section précédente. Les caractéristiques des exploitations utilisées dans cette section proviennent des entretiens réalisés auprès des agriculteurs de la zone d'étude. La procédure d'acquisition de ces données ainsi que leur description sont décrites en détails au chapitre 2, section 2. Pour rappel, 25 agriculteurs furent rencontrés en 2012 ou 2013, cultivant 56 parcelles irriguées.

Traitement des données

La technologie d'irrigation et l'effet d'usage étant interdépendantes, le traitement statistique de ces données doit explicitement permettre de prendre en compte cette endogénéité. L'approche *ESR* (*endogenous switching regression*) permet cette prise en compte en « permettant la détermination conjointe des variables discrètes [la technologie d'irrigation] et les résultats que ces variables affectent [l'effet d'usage] » (Mare and Winship 1987).
L'approche *ESR* n'est que rarement utilisée dans le domaine de l'agriculture, plus rarement encore pour évaluer les performances de l'irrigation. Cette méthode fut par exemple utilisée pour évaluer l'impact de la culture de tissus de bananes sur les rendements au Kenya (Kabunga et al. 2012), l'impact de

l'intensification de la culture du riz sur les rendements au Timor Oriental (Noltze et al. 2013), l'efficacité des stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique en Ethiopie (Di Falco and Veronesi 2013) ou encore l'impact du non-labour sur le bien-être agricole en Syrie (El-Shater et al. 2016). Hormis quelques exemples de ce type, l'immense majorité des applications de l'ESR se cantonne aux domaines de l'économie, de la finance et du marketing (Reis Dos Santos and Reis Dos Santos 2016).
Cette approche est pourtant particulièrement indiquée pour traiter un concept tel que l'efficience de l'irrigation, concept pour lequel l'omission de variable ou l'autocorrélation sont courantes. Ce problème d'endogénéité invalide la plupart des méthodes statistiques classiques et doit donc être explicitement pris en compte, ce que permet l'*ESR*. Le principe de l'*ESR* est de décrire le « comportement » d'un agent *i* à partir de deux équations de régression (équation 7) et d'une fonction de sélection qui détermine le « régime » adopté par l'agent *i* (équation 8).

$$\begin{aligned} y_{1i} &= X_{1i} \cdot b_1 + \varepsilon_{1i} \\ y_{2i} &= X_{2i} \cdot b_2 + \varepsilon_{2i} \end{aligned} \qquad \textbf{(7)}$$

$$\begin{aligned} y_{1i}\ observ\acute{e}\ si \quad & Z_i \cdot g + u_i > 0 \\ y_{2i}\ observ\acute{e}\ si \quad & Z_i \cdot g + u_i \leq 0 \end{aligned} \qquad \textbf{(8)}$$

où y_{1i} et y_{2i} sont les variables dépendantes dans les équations de régression, X_{1i} et X_{2i} les vecteurs de variables explicatives, pour l'agent *i*, des équations de régression, Z_i le vecteur de variables de l'équation de sélection pour l'agent *i*, dont au moins une des variables doit être parfaitement exogène, et b_1, b_2 et g les vecteurs des paramètres de régression respectivement associés à X_{1i}, X_{2i} et Z_i. ε_{1i} et ε_{2i} suivent alors des distributions normales dont la moyenne vaut *0* et les variances respectives σ_1^2 et σ_2^2. u_i suit quant à lui une distribution normale dont la moyenne vaut *0* et la variance vaut *1*. Les paramètres de régression b_1, b_2 et g sont estimés par optimisation du maximum de vraisemblance (Lokshin and Sajaia 2004). Une description détaillée des fondements théoriques de cette méthode se trouve en annexe 3.
Ici, la variable dépendante *y* représente donc l'effet d'usage e_u des différentes exploitations et le vecteur *X* est composé des caractéristiques de ces exploitations. Le régime déterminé par l'équation de sélection est la technique d'irrigation. Cette équation se base sur le vecteur *Z*, qui est composé des caractéristiques comprises dans le vecteur *X* et, en plus, d'au moins une caractéristique des exploitations parfaitement indépendante de

l'effet d'usage e_u, c'est-à-dire que cette caractéristique ne doit en aucune manière être influencée par l'effet d'usage. L'application de l'approche *ESR* permet ainsi d'obtenir deux fonctions d'efficience y_1 (ou η_{u_T1}) et y_2 (ou η_{u_T2}) dont les variables explicatives X sont les caractéristiques des exploitations, considérées comme des indicateurs de la gestion M.

Résultats

Sélection des variables pour l'approche *ESR*

La section précédente a mis en lumière des relations entre l'effet d'usage e_u et un certain nombre de caractéristiques des exploitations, à savoir la technique d'irrigation, les cultures pratiquées, la taille de l'exploitation et la « proportion d'agrumes ». Les travaux présentés au début de cette section concluent, quant à eux, que les principales caractéristiques influençant l'efficience sont la taille de l'exploitation, le type d'irrigation et les aspects fonciers. Les facteurs les plus pertinents pour expliquer l'effet d'usage e_u sont donc le type d'irrigation, la culture pratiquée, la taille de l'exploitation, le statut foncier et la proportion d'agrumes.

Au sein de la zone d'étude, 3 statuts fonciers différents sont observés : les exploitants *propriétaires*, les exploitants *locataires* et les exploitants dits *héritiers*. Les exploitants *propriétaires* sont, comme leur nom l'indique, propriétaires de leur exploitation et présentent donc une stabilité foncière importante. Les exploitants *locataires* sont pour la plupart de gros exploitants cultivant des terres appartenant à l'état marocain et disposant de baux à très long terme ; leur situation est donc également très stable sur le plan foncier. Les exploitants *héritiers* regroupent des exploitations, souvent de petite taille, dont les parents de l'exploitant étaient propriétaires mais dont les héritiers n'ont pas formellement réglé les questions de succession. Le statut des terres exploitées est alors très incertain et ces exploitants courent le risque de voir l'un ou l'autre légataire réclamer ses droits, en terre ou en argent. Ce statut foncier est donc, de loin, plus instable que les deux autres. Pour cette raison, une variable *stabilité du statut foncier* binaire a été créée, regroupant d'une part les exploitants *propriétaires* et *locataires*, d'autre part les exploitants *héritiers*.

Après analyse, il s'avère que les variables *culture* et *proportion d'agrumes* posent problème pour l'implémentation de la méthode *ESR*. Sur le plan sémantique, la variable *proportion d'agrumes* peut être vue comme un indicateur du mode de gestion de l'exploitation, certaines exploitations étant fortement spécialisées dans la production d'agrumes (leur *proportion*

d'agrumes est alors toujours supérieure à 70%) tandis que d'autres sont plus diversifiées (leur *proportion d'agrumes* varie alors entre 30 et 80%). Le problème apparait lorsque la *proportion d'agrumes* est nulle. « Nulle » étant classé comme faible, ces exploitations sont interprétées comme étant très diversifiées alors que, dans la réalité, il s'agit bien souvent d'exploitations très spécialisées dans une culture autre que les agrumes, typiquement les cultures maraichères ou les nèfles. La définition d'une nouvelle variable, plus appropriée pour refléter le taux de spécialisation, s'impose donc. La variable *spécialisation* est ainsi définie comme une variable binaire qui prend la valeur de *1* lorsqu'un seul type de culture irriguée est pratiqué sur l'exploitation.

La variable *culture*, quant à elle, pose problème car plusieurs combinaisons formées contiennent alors trop peu d'agents (de parcelles). Ainsi, les combinaisons *nèfles x goutte-à-goutte* et *céréales x goutte-à-goutte* ne contiennent aucune parcelle et l'impact de la technique d'irrigation sur l'efficience est donc inobservable pour ces parcelles. La combinaison *maraichage x gravitaire*, avec seulement 2 parcelles, peut également poser des problèmes à ce niveau. Remplacer la variable *culture* par la variable *agrumes* permet de contrer ce problème. La distinction est alors faite uniquement entre les cultures d'agrumes et les autres cultures et le nombre de parcelles dans chaque combinaison possible est alors satisfaisant (la combinaison la moins représentée est alors la combinaison *autres cultures=0 x goutte-à-goutte*, qui contient 6 parcelles).

Les vecteurs de variables explicatives des équations de régression X_1 et X_2 sont donc maintenant composés de la variable *agrumes*, de la *taille de l'exploitation* et de la *spécialisation* tandis que le vecteur de variables de l'équation de sélection Z sera quant à lui composé de la *stabilité du statut foncier*, de la variable *agrumes*, de la *taille de l'exploitation* et de la *spécialisation*. Sous cette nouvelle configuration, toutes les combinaisons possibles furent testées (tableau 9).

Le jeu de données utilisé provient des entretiens réalisés auprès des agriculteurs (section 2.2) et est composé de 56 parcelles exploitées par 25 agriculteurs. Cet échantillon est très réduit et l'application de l'*ESR* est donc très sensible à la présence de certaines données particulières. La suppression d'une exploitation particulière permet d'obtenir des résultats supplémentaires (tableau 9).

Cette exploitation présente des caractéristiques très particulières et l'écarter se justifie par son manque de représentativité, et ce en raison de sa grande taille (400 ha, soit 10% de la zone d'étude à elle seule). Ce sont ainsi 8

parcelles supplémentaires qui sont éliminées. Cela revient à écarter de l'échantillon l'ensemble des exploitations dont la taille officielle est supérieure à 100 ha. Au final, l'approche *ESR* fut donc implémentée sur deux échantillons différents : le premier composé de 56 parcelles exploitées par 25 agriculteurs et le second de 48 parcelles exploitées par 24 agriculteurs.

Tableau 9 : Résultats de l'implémentation de l'approche *ESR* pour toutes les combinaisons de variables testées (les composantes des vecteurs X et Z sont renseignées par les 'x', la mention 'NaN' dans les colonnes 'Résultats' signifie que l'algorithme d'implémentation de l'approche *ESR* est incapable de proposer un résultat pour cette combinaison de variables). Les valeurs dans les colonnes 'Résultats' sont le résultat de l'optimisation par maximisation de la vraisemblance ($P>\chi^2$).

Vecteur Z	**Vecteurs X_1, X_2 et Z**			**Résultats ($P>\chi^2$) de l'implémentation de l'approche *ESR***	
Statut foncier instable	*Agrumes*	*Taille exploitation*	*Spécialisation*	25 agriculteurs, 56 parcelles	24 agriculteurs, 48 parcelles
x	x	x	x	NaN	NaN
x	x	x		0.0004	NaN
x	x		x	NaN	NaN
x		x	x	NaN	0.0008
x	x			NaN	NaN
x		x		0.0008	NaN
x			x	NaN	NaN

Présentation des données

Deux jeux de données furent donc utilisés, le premier composé de 56 parcelles exploitées par 25 agriculteurs et le second de 48 parcelles exploitées par 24 agriculteurs. Les principales caractéristiques de ces jeux de données sont présentées aux tableaux 10 (pour le jeu de données complet) et 11 (pour le jeu de données limité aux exploitations de moins de 100 ha).

Tableau 10 : Synthèse du premier jeu de données utilisé pour l'approche *ESR* (jeu de données complet). Les moyennes et écarts types sont calculés pour l'ensemble des parcelles. Les nombres renseignés [#] sont des nombres de parcelles.

	Irrigation gravitaire (28 parcelles)		**Irrigation goutte-à-goutte (28 parcelles)**	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Efficience de l'irrigation (η) [%]	62.8	27.9	65.6	36.1
Effet d'usage (e_u) [%]	109.3	48.5	79.5	43.8
Taille de l'exploitation [ha]	3.9	1.5	127.0	177.2
Proportion d'agrumes* [-]	0.61	0.25	0.69	0.33
Exploitations spécialisées** [#]	8	--	25	--
Exploitations non spécialisées** [#]	20	--	3	--
Statut foncier stable*** [#]	17	--	20	--
Statut foncier instable*** [#]	11	--	8	--
Cultures d'agrumes [#]	17	--	22	--
Cultures maraichères [#]	2	--	6	--
Cultures de céréales [#]	5	--	0	--
Cultures de nèfles [#]	4	--	0	--

*Définie comme le rapport entre la superficie d'agrumes effectivement cultivée et la taille officielle de l'exploitation

**Une exploitation est considérée comme non spécialisée si plusieurs types de culture irriguée y sont pratiqués.

***Le statut d'*héritier* est considéré comme instable, les autres statuts fonciers sont considérés comme stables

Au total, le second jeu de données reprend les données relatives à 48 parcelles, appartenant à 24 exploitations. Parmi celles-ci, 28 sont irriguées par voie gravitaire et 20 au goutte-à-goutte. Les principales caractéristiques de ces parcelles sont présentées au tableau 11. Les efficiences de l'irrigation η et effets d'usage e_u y sont, comme annoncé, très variables, avec des écarts types systématiquement supérieurs à 25%. La taille des exploitations est assez homogène pour les parcelles irriguées par voie gravitaire tandis qu'elle est très variable pour les parcelles irriguées au goutte-à-goutte, alors même que la plus grande exploitation fut exclue de l'analyse. C'est aussi au sein de ce dernier groupe que l'on retrouve les plus grandes exploitations.

Tableau 11 : Synthèse du second jeu de données utilisé pour l'approche *ESR* (toutes les exploitations du premier jeu de données dont la taille officielle est inférieure à 100 ha). Les moyennes et écarts types sont calculés pour l'ensemble des parcelles. Les nombres renseignés [*#*] sont des nombres de parcelles.

	Irrigation gravitaire (28 parcelles)		**Irrigation goutte-à-goutte (20 parcelles)**	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Efficience de l'irrigation (η) [%]	62.8	27.9	51.9	34.2
Effet d'usage (e_u) [%]	109.3	48.5	63.0	41.4
Taille de l'exploitation [ha]	3.9	1.5	17.8	26.8
Proportion d'agrumes* [-]	0.61	0.25	0.62	0.37
Exploitations spécialisées** [#]	8	--	17	--
Exploitations non spécialisées** [#]	20	--	3	--
Statut foncier stable*** [#]	17	--	12	--
Statut foncier instable*** [#]	11	--	8	--
Cultures d'agrumes [#]	17	--	14	--
Cultures maraichères [#]	2	--	6	--
Cultures de céréales [#]	5	--	0	--
Cultures de nèfles [#]	4	--	0	--

*Définie comme le rapport entre la superficie d'agrumes effectivement cultivée et la taille officielle de l'exploitation

**Une exploitation est considérée comme non spécialisée si plusieurs types de culture irriguée y sont pratiqués.

***Le statut d'*héritier* est considéré comme instable, les autres statuts fonciers sont considérés comme stables

Les exploitations ont été classées en fonction de leur spécialisation. La *spécialisation* est ici une variable binaire. Une parcelle est dite spécialisée lorsque seule une culture irriguée est pratiquée par l'exploitant. La proportion d'exploitations spécialisées parmi les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte est importante ; à l'inverse, la majorité des exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire n'est pas spécialisée.

Au sein de la zone d'étude, 3 statuts fonciers différents sont observés : les exploitants *propriétaires*, les exploitants *locataires* et les exploitants dits *héritiers*. Les exploitants *propriétaires* sont, comme leur nom l'indique, propriétaires de leur exploitation et présentent donc une stabilité foncière importante. Les exploitants *locataires* sont pour la plupart de gros exploitants cultivant des terres appartenant à l'état marocain et disposant de baux à très long terme ; leur situation est donc également très stable sur le plan foncier. Les exploitants *héritiers* regroupent des exploitations, souvent

de petite taille, dont les parents de l'exploitant étaient propriétaires mais dont les héritiers n'ont pas formellement réglé les questions de succession. Le statut des terres exploitées est alors très incertain et ces exploitants courent le risque de voir l'un ou l'autre légataire réclamer ses droits, en terre ou en argent. Ce statut foncier est donc, de loin, plus instable que les deux autres statuts. Pour cette raison, une variable *stabilité du statut foncier* binaire a été créée, regroupant d'une part les exploitants *propriétaires* et *locataires*, d'autre part les exploitants *héritiers*.

Enfin, comme attendu, toutes les cultures sont pratiquées dans les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire et les agrumes y sont majoritaires. Dans les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte par contre, seules les cultures d'agrumes et les cultures maraichères sont représentées. Cette technologie n'est en effet pas du tout adaptée à la culture des céréales et les cultures de nèfles étant, dans la zone étudiée, systématiquement irriguées par voie gravitaire.

Toutes ces observations restent vraies pour le jeu de données complet, bien que les contrastes y soient plus marqués encore (tableau 10). La seule différence entre ces deux jeux de données consiste en la présence d'une exploitation de 400 ha exploitant 8 parcelles. Cette exploitation pratique l'irrigation goutte-à-goutte, a une efficience de l'irrigation η très élevée, supérieure à 99%, et son effet d'usage e_u y est donc très élevée également, supérieur à 120%. Elle est spécialisée, son statut foncier est stable et seuls des agrumes y sont régulièrement cultivés.

Implémentation de l'approche *ESR*

L'implémentation de l'approche *ESR*, réalisée avec le logiciel Stata en utilisant la commande *Movestay*, s'avère donc pertinente pour trois combinaisons de facteurs : la taille de l'exploitation ou la taille de l'exploitation et la présence d'une culture d'agrumes pour le jeu de données complet et la taille de l'exploitation et la spécialisation pour le jeu de données limité aux exploitations de moins de 100 ha (tableau 9). Dans toutes ces combinaisons, la stabilité du statut foncier est utilisée comme variable parfaitement indépendante de l'effet d'usage e_u et est donc intégrée dans le vecteur de variables de l'équation de sélection Z.

Parmi ces trois combinaisons, l'utilisation de la taille de l'exploitation avec l'échantillon complet est statistiquement moins pertinente que son utilisation combinée à la présence d'agrumes. Par ailleurs, les valeurs des paramètres de régression b et g associés à la variable *taille de l'exploitation* sont très proches. L'analyse détaillée des résultats de l'approche *ESR* implémentée

avec, pour seule variable, la *taille de l'exploitation* n'apporte donc aucune information supplémentaire et ne sera donc pas détaillée ici. La pertinence statistique de l'utilisation, seule, de cette variable illustre toutefois à nouveau l'importance de cette variable sur les valeurs d'effet d'usage e_u des parcelles irriguées.

Lorsque le jeu de données complet est utilisé, l'implémentation de l'approche *ESR* s'avère donc concluante et riche en enseignements lorsque les variables *taille de l'exploitation* et *agrumes* sont considérées (tableau 12). Lorsque le jeu de données est limité aux exploitations de moins de 100 ha, la combinaison des variables *taille de l'exploitation* et *spécialisation* est la seule pertinente (tableau 13).

Tableau 12 : Résultats de l'implémentation de la méthode *ESR* pour le jeu de données complet. Pour l'optimisation, le nombre d'observations est de 56 et le résultat de l'optimisation par maximisation de la vraisemblance est très bon ($P>\chi^2 = 0.0004$). Au niveau du modèle de régression, les résultats du test d'indépendance montrent que les deux équations sont très significativement différentes ($P>\chi^2 = 0.0009$).

	Coefficient	Ecart type	P>|z|	Intervalle de confiance (95%)
Equation de sélection (goutte-à-goutte)				
Taille de l'exploitation	0.1803	0.1116	0.106	[-0.0385 : 0.3991]
Agrumes	0.5487	0.3688	0.137	[-0.1741 : 1.2715]
Statut foncier instable	0.4612	0.0615	0.000	[0.3405 : 0.5818]
Terme indépendant	-1.6997	0.5092	0.001	[-2.6978 : -0.7016]
Régime 1 (goutte-à-goutte)				
Taille de l'exploitation	0.1664	0.0424	0.000	[0.0833 : 0.2496]
Agrumes	-16.8845	15.5762	0.278	[-47.4132 : 13.6443]
Terme indépendant	72.8372	13.9885	0.000	[45.4202 : 100.2542]
Régime 2 (gravitaire)				
Taille de l'exploitation	-0.2569	6.8497	0.970	[-13.6820 : 13.1683]
Agrumes	15.2627	23.1346	0.509	[-30.0802 : 60.6056]
Terme indépendant	132.7930	29.4875	0.000	[74.9986 : 190.5874]
$\rho_1 = \text{corr}(\varepsilon_1, u)$	-0.0736	0.3224		[-0.6101 : 0.5091]
$\rho_2 = \text{corr}(\varepsilon_2, u)$	1	$1.65.10^{-12}$		[-1 : 1]

Tableau 13 : Résultats de l'implémentation de la méthode *ESR* pour le jeu de données limité aux exploitations de moins de 100 ha. Pour l'optimisation, le nombre d'observations est de 48 et le résultat de l'optimisation par maximisation de la vraisemblance est très bon (P>χ^2 = 0.0008). Au niveau du modèle de régression, les résultats du test d'indépendance montrent que les deux équations sont très significativement différentes (P>χ^2 = 0.0024).

	Coefficient	Ecart type	P>|z|	Intervalle de confiance (95%)
Equation de sélection (goutte-à-goutte)				
Taille de l'exploitation	0.1942	0.1166	0.096	[-0.0343 : 0.4228]
Spécialisation	1.5322	0.4064	0.000	[0.7357 : 2.3287]
Statut foncier instable	-0.0478	0.0064	0.000	[-0.0604 : -0.0352]
Terme indépendant	-1.9031	0.5566	0.001	[-2.9940 : -0.8122]
Régime 1 (goutte-à-goutte)				
Taille de l'exploitation	0.9423	0.3006	0.002	[0.3531 : 1.5315]
Spécialisation	-43.9316	26.8517	0.102	[-96.5599 : 8.6968]
Terme indépendant	82.5547	32.3459	0.011	[19.1579 : 145.9516]
Régime 2 (gravitaire)				
Taille de l'exploitation	2.9682	7.0906	0.675	[-10.9292 : 16.8657]
Spécialisation	43.6752	20.7973	0.036	[2.9132 : 84.4371]
Terme indépendant	109.2437	34.1383	0.001	[42.3340 : 176.1535]
ρ_1 = corr(ε_1,u)	0.0547	0.5258		[-0.7526 : 0.7963]
ρ_2 = corr(ε_2,u)	1	$1.24.10^{-11}$		[-1 : 1]

Les résultats de l'équation de sélection diffèrent sensiblement selon les variables utilisées. Lorsque les variables *taille de l'exploitation* et *agrumes* sont utilisées, seuls le statut foncier et le terme indépendant sont statistiquement significatifs et indiquent qu'un statut foncier instable est positivement corrélé à la pratique de l'irrigation goutte-à-goutte, ce qui est *a priori* surprenant. L'utilisation de cette équation donne toutefois d'assez bons résultats, puisque 45 parcelles sur les 56 voient leur type d'irrigation correctement identifié, soit 80% des parcelles.

Lorsque les variables *taille de l'exploitation* et *spécialisation* sont utilisées, tous les paramètres sont statistiquement significatifs. Ils indiquent qu'un statut foncier stable est positivement corrélé à la pratique de l'irrigation goutte-à-goutte, ce qui est *a priori* cohérent. De même, la spécialisation des exploitations et leur taille sont positivement corrélées à la pratique du goutte-à-goutte. L'utilisation de cette équation donne également de bons résultats, puisque 39 parcelles sur les 48 voient leur type d'irrigation correctement identifié, soit 81% des parcelles. Lorsque l'exploitation de plus de 100 ha est ajoutée à ce calcul, son irrigation est correctement identifiée et 47 parcelles sur 56 sont alors correctement classées, soit 84%.

L'équation de régression en régime 1 (goutte-à-goutte) est similaire quelles que soient les variables utilisées. Elle confirme que l'influence de la taille de l'exploitation sur l'effet d'usage est très significative. L'influence de la spécialisation n'est par contre pas significative et celle de la culture en agrumes encore moins. Plus la taille d'une exploitation est importante, meilleure sera donc son effet d'usage. La spécialisation influencerait par contre négativement l'effet d'usage. Une exploitation diversifiée sera donc plus susceptible d'avoir des valeurs d'effet d'usage élevées. La validité statistique de cette affirmation peut toutefois être discutée, la p_{value} associée à ce coefficient étant très légèrement supérieure à 0.1 (il vaut 0.102), valeur au-dessus de laquelle la validité statistique est généralement considérée comme non-avenante. L'intervalle de confiance à 95%, bien que majoritairement négatif, comprend d'ailleurs une partie positive (il va de -96.6 à 8.7).

La signifiance des coefficients de l'équation de régression du régime 2 (gravitaire) ne sont par contre significatifs que lorsque les variables *taille de l'exploitation* et *spécialisation* sont utilisées, et uniquement pour la variable *spécialisation*. Il semble donc que ni la taille de l'exploitation ni la présence d'agrumes n'aient d'influence sur les valeurs d'effet d'usage des exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire. Le coefficient positif associé à la variable *spécialisation* indique ici qu'une exploitation spécialisée est plus susceptible d'avoir des valeurs d'effet d'usage élevée.

Pour terminer, les corrélations observées entre les distributions des résidus des équations de régression ε_1 et ε_2 et celles des résidus de l'équation de sélection u_1 et u_2 ne sont absolument pas significatifs, leur intervalle de confiance étant beaucoup trop large. Dès lors, rien ne permet d'affirmer que les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire augmentent leur effet d'usage grâce à la pratique de l'irrigation gravitaire et *vice versa*.

Discussion

La formulation retenue pour la suite de cette analyse est celle qui fait intervenir les variables *taille de l'exploitation* et *spécialisation*. Par rapport à l'autre relation obtenue, celle-ci présente en effet un plus grand nombre de paramètres significatifs pour l'équation de sélection, ne présente aucune différence significative au niveau de l'équation de régression lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée mais présente par contre des résultats significatifs pour l'équation de régression lorsque l'irrigation gravitaire est pratiquée. Par ailleurs, lorsque la variable *agrumes* est ajoutée

à l'analyse, la validité des coefficients qui sont associés à cette variable est systématiquement nulle.
La relation retenue n'est par contre pas valable pour les exploitations de plus de 100 ha. Cela ne concerne toutefois que deux exploitations pour l'ensemble de la zone d'étude (une de 400 ha et une de 135 ha). L'exploitation de 400 ha a par ailleurs été visitée et les valeurs d'efficience et d'effet d'usage y sont connues. Pour ces deux exploitations, une efficience de 100%, observée pour l'exploitation de 400 ha, pourrait donc être attribuée si ces résultats devaient être extrapolés à l'ensemble de la zone d'étude.
La formulation de l'effet d'usage sous sa forme $e_{u_Ti}(M_{Ti})$ (équation 6) peut donc être maintenant quantifiée d'après les résultats de l'approche *ESR* pour l'irrigation gravitaire (équation 9) et goutte-à-goutte (équation 10).

$$e_{u_{T1}}(M_{T1}) = 109.244 + 2.968\ tf + 43.675\ sp \quad \textbf{(9)}$$

$$e_{u_{T2}}(M_{T2}) = 82.555 + 0.942\ tf - 43.932\ sp \quad \textbf{(10)}$$

où $\eta e_{u_T1}(M_{T1})$ est la fonction d'effet d'usage lorsque l'irrigation gravitaire est pratiquée et $e_{u_T2}(M_{T2})$ la fonction d'effet d'usage lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée, *tf* est la taille de l'exploitation [ha] et *sp* est la variable binaire de spécialisation. La composante *tf* de l'équation 9 n'est toutefois pas statistiquement significative ; la signifiance statistique de la composante *sp* de l'équation 10 peut également être contestée.
L'existence de ces deux relations, différant tant du point de vue de la signifiance statistique que du point de vue de la valeur et même du signe des coefficients, illustre la pertinence de distinguer deux relations différentes en fonction du type d'irrigation. Elle valide ainsi la formulation de deux fonctions d'effet d'usage différentes selon la technique d'irrigation pratiquée.
Par ailleurs, les relations d'effet d'usage étant fonction de la taille de l'exploitation *tf* et de la spécialisation *sp*, ces deux facteurs s'avèrent donc ici les indicateurs les plus pertinents pour représenter la gestion M_{Ti}. L'analyse de ces indicateurs montre de fortes différences selon le type d'irrigation. La *taille de l'exploitation* des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte est beaucoup plus variable et leur taille moyenne est beaucoup plus élevée que lorsque l'irrigation gravitaire est pratiquée. La spécialisation aussi varie très fort d'un groupe à l'autre, avec un taux de spécialisation nettement plus élevé lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée

(tableau 11). L'usage, représenté par ces deux facteurs, présente donc deux profils très différents selon le type d'irrigation. La distinction entre la gestion lorsque l'irrigation gravitaire est pratiquée M_{T1} et celle lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée M_{T2} est donc pleinement justifiée.

Il apparait dès lors que les facteurs explicatifs les plus significatifs de l'effet d'usage, la taille de l'exploitation, la spécialisation et le statut foncier, sont tous trois propres à l'exploitation. En ajoutant la technique d'irrigation, généralement commune sur l'ensemble de l'exploitation, tous les déterminants de l'efficience de l'irrigation se situent à l'échelle de l'exploitation. Ce serait donc à ce niveau, et non à l'échelle de la parcelle, que se situent les déterminants de l'efficience de l'irrigation. Cet état de fait confirme encore, si besoin est, que la gestion de l'exploitation a une influence primordiale sur l'efficience de l'irrigation. L'amélioration de l'efficience de l'irrigation passerait donc impérativement par une prise en compte explicite de cette gestion et une attention toute particulière doit être dédiée à cet aspect dans toute politique visant à améliorer cette efficience.

Les résultats ici présentés vont dans le sens des précédentes études résumées au début de cette section. Si, au regard de ces études, la taille de l'exploitation avait un effet variable, il semble ici que son impact direct sur l'efficience de l'irrigation goutte-à-goutte soit positif. Cette affirmation doit toutefois être nuancée : l'effet de la valeur positive du coefficient associé au facteur *taille de l'exploitation* dans la relation d'efficience d'usage pour l'irrigation goutte-à-goutte (équation 10) est compensé par la nette diminution d'effet d'usage observée lors du passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte. Ainsi, lorsque les exploitations sont spécialisées, si la taille de l'exploitation a un impact positif sur l'effet d'usage des exploitations irriguées en goutte-à-goutte, les toutes petites exploitations ont des valeurs d'effet d'usage plus élevées car elles pratiquent l'irrigation gravitaire, technique avec laquelle l'effet d'usage est alors plus élevée. Cette observation reflète peut-être, dans notre échantillon, les bonnes efficiences observées pour les cultures de nèfles, essentiellement pratiquées dans des petites exploitations spécialisées.

La *spécialisation* prend quant à elle une importance particulière. Elle a en effet une influence primordiale sur l'équation de sélection. Comme le montre le tableau 14, la taille critique (taille sous laquelle la technique d'irrigation est généralement gravitaire, au-dessus de laquelle elle est généralement goutte-à-goutte) est de l'ordre de 10 ha pour les exploitations non spécialisées tandis qu'elle est de l'ordre de 2 ha pour les exploitations spécialisées. La majorité des exploitations spécialisées pratique donc

l'irrigation goutte-à-goutte. Une exception notable concerne les exploitations pratiquant la culture des nèfles, culture qui, nous l'avons déjà mentionné, est pratiquée par des exploitants ayant un profil très spécifique.

Tableau 14 : Taille critique de l'exploitation [ha] pour le passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte (valeur de la taille de l'exploitation pour laquelle l'équation de sélection Z.g+u = 0).

		Statut foncier instable	
		0 (non)	1 (oui)
Spécialisation	0 (non)	9.8 ha	10.0 ha
	1 (oui)	1.9 ha	2.2 ha

Cet état de fait n'est pas sans conséquence puisque le passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte entraine une modification complète du mode de gestion et a donc des impacts importants sur les valeurs d'efficience observées. Pour les exploitations spécialisées, le passage à l'irrigation goutte-à-goutte se traduit ainsi par une diminution très nette de l'effet d'usage. Cette diminution ne peut qu'être interprétée comme une absence totale de considération pour la quantité d'eau consommée. L'objectif de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte de ces exploitations doit dès lors être cherché ailleurs.

Lorsque les exploitations ne sont pas spécialisées, l'effet de la taille de l'exploitation est moins clair. La diminution d'effet d'usage associée au passage au goutte-à-goutte y est moins remarquable. Par ailleurs, le paramètre associé à la *taille de l'exploitation* pour les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire, soit toutes les exploitations non-spécialisées de moins de 10 ha d'après le modèle, n'est absolument pas significatif.

Enfin, le *statut foncier* n'intervient que dans l'équation de sélection. Si un statut foncier stable encourage le passage au goutte-à-goutte, cet effet est cependant minime. Tout au plus, la taille critique des exploitations pour la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte est-elle très légèrement plus faible lorsque le statut foncier est stable (tableau 14).

Conclusion

Le choix de la technique d'irrigation dépend en partie du mode de gestion de l'agriculteur. A l'inverse, le mode de gestion dépend du type d'irrigation. La technique d'irrigation et l'efficience, qui dépend elle-même de l'usage, sont donc endogènes et la manipulation de ces notions requiert un traitement statistique particulier. L'étude de l'interdépendance entre l'usage et la

technique d'irrigation est donc réalisée en utilisant une méthode robuste qui permette de traiter explicitement cette endogénéité. Ainsi, les déterminants de l'effet d'usage sont identifiés et quantifiés et l'hypothèse selon laquelle la fonction d'effet d'usage est elle-même fonction du type d'irrigation est démontrée.

L'approche *ESR* implémentée permet d'abord d'obtenir une équation de sélection qui détermine le régime adopté, ici la technique d'irrigation utilisée par l'agriculteur. Trois variables s'avèrent pertinentes pour déterminer la technique d'irrigation : la *taille de l'exploitation*, le taux de *spécialisation* et la stabilité du *statut foncier*. A partir de ces variables, l'équation de sélection permet de prédire correctement le choix effectué sur 39 des 48 parcelles traitées. Elle s'avère donc très performante et est par ailleurs statistiquement très significative. Comme attendu, elle indique que l'adoption du goutte-à-goutte est encouragée par une grande taille d'exploitation, par un taux de spécialisation élevé et, dans une moindre mesure, par un statut foncier stable. Selon la technique d'irrigation, l'effet d'usage est ensuite représenté par une équation de régression différente. Les variables identifiées comme les plus pertinentes pour cette équation sont la *taille de l'exploitation* et le *taux de spécialisation*. Pour l'irrigation gravitaire, la taille de l'exploitation n'est pas significativement corrélée à l'effet d'usage tandis que le taux de spécialisation favorise un effet d'usage élevé. Pour l'irrigation goutte-à-goutte, les résultats de l'équation de régression indiquent un effet défavorable d'un taux de spécialisation élevé mais cet effet est statistiquement contestable. Une corrélation positive de la taille de l'exploitation sur l'effet d'usage est par contre très nette. La différence entre ces deux relations illustre la pertinence de distinguer deux relations d'usage différentes selon le type d'irrigation.

Ces deux relations lient la *taille de l'exploitation* et le *taux de spécialisation* à l'effet d'usage. Ces deux facteurs s'avèrent donc les indicateurs les plus pertinents de la gestion (*M*) de l'agriculteur. Ils varient d'ailleurs très fortement selon le type d'irrigation pratiqué, la taille des exploitations étant en moyenne plus grande et beaucoup plus variable lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée et le taux de spécialisation étant alors beaucoup plus important. La gestion (*M*), représentée par ces deux facteurs, varie donc fortement selon le type d'irrigation.

L'analyse détaillée de ces relations montre l'influence primordiale de la taille de l'exploitation et du taux de spécialisation. Ainsi, les toutes petites exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire et les très grandes exploitations ont des effets d'usage très élevés tandis que les exploitations

spécialisées de taille moyenne présentent des valeurs d'effet d'usage plus faibles.

Le taux de spécialisation influence quant à lui fortement le choix de la technique d'irrigation. Parmi les exploitations spécialisées, seules les petites (<2 ha) pratiquent en effet l'irrigation gravitaire. Lorsque les exploitations ne sont pas spécialisées, cette taille « critique » sous laquelle la majorité des exploitations pratiquent l'irrigation gravitaire monte à 10 ha. Enfin, l'observation la plus marquante est sans doute une absence totale de considération pour la quantité d'eau consommée dans les exploitations spécialisées de taille moyenne, indiquant que l'objectif de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte n'est pas de cet ordre.

L'effet d'usage peut maintenant être exprimé en fonction de la gestion, représentée par la taille de l'exploitation et le taux de spécialisation, et de la technique d'irrigation. L'impact d'un changement de technique d'irrigation de grande ampleur peut maintenant être étudié sur cette base.

3.3 - Efficience de l'irrigation à l'échelle du périmètre dans un contexte de transition à l'irrigation goutte-à-goutte : pressions sur les ressources en eau

Introduction

L'agriculture irriguée est, à l'échelle mondiale, le premier secteur en ce qui concerne la consommation d'eau douce. L'amélioration de la gestion de l'eau agricole est donc un objectif clé pour résoudre la crise de l'eau à laquelle font face plusieurs régions du globe. Pour économiser de l'eau agricole, le fameux slogan de la FAO « *more crop per drop* » a été pris à la lettre dans plusieurs zones arides ou semi-arides de par le monde. Des politiques visant à améliorer les « efficiences » (l'*efficience de l'irrigation*, la *productivité de l'eau*, l'*efficience de l'utilisation de l'eau*…) ont ainsi été implémentées, se traduisant bien souvent par la promotion de technologies réputées économes en eau.

En 1865, en étudiant la consommation de charbon en Angleterre, l'économiste W. S. Jevons a mis en évidence le fait qu'améliorer l'efficience de l'utilisation du charbon pouvait, paradoxalement, conduire à une augmentation de sa consommation. Plusieurs économistes ont ensuite approfondi cette idée et l'ont élargie à l'ensemble des technologies économes en ressources de manière générale en montrant que, par ce qu'ils appelèrent l'*effet rebond*, l'adoption de technologies plus efficientes en terme d'utilisation de ressources pouvait, dans certains cas, mener à une consommation globale de la ressource accrue si l'adoption de telles technologies n'était pas accompagnée d'autres mesures visant à compenser cet effet (Schneider 2010).

Deux raisons peuvent être évoquées pour expliquer l'*effet rebond*. Tout d'abord, par *effet de substitution*, une augmentation de l'efficience d'utilisation d'une ressource rend cette ressource plus intéressante à utiliser par rapport à d'autres ressources substituables, ce qui entraine une diminution de consommation de ces autres ressources au profit de la première. Ensuite, l'augmentation de revenu qui découle de l'utilisation plus efficiente d'une ressource et donc de sa moindre utilisation pour un même niveau de production, l'effet de revenu, entraine une augmentation des

bénéfices qui se traduit elle aussi par une augmentation globale de la consommation (Polimeni et al. 2012).

Au regard de ces considérations émerge la question de savoir dans quelle mesure les technologies réputées économes en eau, typiquement la technologie goutte-à-goutte, sont adaptées pour économiser de l'eau à large échelle. L'objectif de la présente section est de répondre à cette question *via* l'analyse de la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans le CMV103 du périmètre des Triffa. En intégrant à l'analyse les résultats présentés plus tôt dans ce chapitre, l'impact de la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte sur les ressources en eau régionales sera donc étudié.

Les deux points de vue, technique et économique, exposés ci-dessus donnent à cette question deux réponses antagonistes. La réalité est donc loin d'être triviale et mérite d'être caractérisée avec attention. Une méthodologie appropriée doit donc être mise en place afin d'y répondre avec soin.

Dans tout processus d'évaluation, le positionnement des limites du système a un impact très important sur la valeur des indicateurs utilisés. Les impacts à grande échelle de la conversion sont donc susceptibles de différer sensiblement des impacts locaux observés précédemment et une méthodologie spécifique mérite d'être implémentée pour étendre valablement ces résultats à l'échelle du périmètre irrigué dans son ensemble (Willardson et al. 1994; Bastiaanssen et al. 2007; Perry 2011; Borgia et al. 2012).

Comme ce fut déjà mentionné à maintes reprises dans ce document, la qualité et la disponibilité des données relatives à l'irrigation sont souvent pauvres (Bastiaanssen et al. 2007). Maximiser l'information qui peut être obtenue à partir de ces quelques données existantes constitue donc un défi majeur pour toute évaluation relative à l'irrigation. La prise en compte explicite de cette problématique est donc indispensable. Par ailleurs, la plupart des indicateurs relatifs aux pressions sur les ressources en eau reposent sur les différents flux intervenant dans le bilan hydrique de la zone étudiée (Bos et al. 2005; García-Bolaños et al. 2011; Phadnis and Kulshrestha 2013). Une manière efficace d'évaluer l'évolution de ces pressions à large échelle serait donc de partir des données disponibles pour implémenter un modèle de bilan hydrique cohérent avec celles-ci.

Les modèles de bilan hydrique présentent plusieurs avantages. Ils sont conceptuellement solides et basés sur des concepts physiques généralement bien acceptés. Ils sont rapides, peuvent être faciles à implémenter et sont généralement associés à un degré d'incertitude acceptable lorsque la

disponibilité des données est faible (Bastiaanssen et al. 2007). De plus, puisqu'ils sont simples et faciles à comprendre, les évaluations basées sur ces modèles peuvent être facilement appropriées par les différents acteurs du monde de l'irrigation (Blanke et al. 2007; Batt and Merkley 2010). Toutefois, la qualité des modèles de bilan hydrique repose également sur la qualité des données utilisées pour représenter les différents flux. Etant donnée la faible qualité des données relatives à l'irrigation, un tel modèle se doit d'être parcimonieux, c'est-à-dire que la complexité de la structure du modèle doit être cohérente avec la qualité des données et doit permettre une évaluation robuste et précise des pratiques d'irrigation.

Méthodologie

La mise en place d'un modèle de bilan hydrique pour l'ensemble de la zone d'étude permettrait donc de répondre valablement aux objectifs tout en étant adaptée aux données disponibles. Cette mise en place implique de quantifier les différents flux intervenant dans le bilan hydrique et permet donc de quantifier plusieurs indicateurs sur la base de ces différents flux. Enfin, et malgré l'hypothèse de régime permanent qui sous-tend ici la quantification des flux dans le modèle, elle permet une appréhension fine des dynamiques et interactions qui existent entre ces différents flux.

Fonctionnement hydrologique de la zone d'étude

Très schématiquement, la zone d'étude peut être représentée par trois réservoirs : le sol des parcelles irriguées, le sol des superficies non-irriguées et la nappe d'eau souterraine (figure 26). Le volume d'eau contenu dans ces réservoirs varie au cours du temps en fonction du volume des différents flux qui y entrent et en sortent. Ces différents flux connectent par ailleurs certains de ces réservoirs entre eux.

Les parcelles irriguées peuvent être alimentées en eau par la pluie et l'irrigation. L'irrigation peut provenir de la nappe souterraine par pompage, du barrage situé en amont, hors de la zone d'étude, ou des deux à la fois. L'eau sort de ces parcelles par évapotranspiration et par drainage. Elle rejoint dans ce cas la nappe d'eau souterraine. Les parcelles non-irriguées ne sont alimentées en eau que par la pluie. L'évapotranspiration et le drainage vers la nappe sont les principales sorties de ce réservoir. La nappe est alimentée par le drainage provenant de la surface et par drainage latéral depuis la partie de la nappe située en amont de la zone d'étude ; ses principales sorties sont le drainage latéral vers la partie de la nappe située en aval de la zone d'étude et le pompage pour l'irrigation.

Plusieurs simplifications sont évidemment effectuées pour arriver à cette représentation schématique. Au niveau des réservoirs, les hypothèses les plus évidentes sont l'absence de prise en compte des surfaces imperméables dans les superficies non-irriguées et la représentation de la nappe d'eau souterraine comme un réservoir unique. Le pourcentage de surface imperméable est toutefois minime, la plupart des routes étant en fait des pistes perméables et très peu de construction étant présentes sur la zone d'étude. L'aquifère présent dans le sol de la zone étudiée présente quant à lui une structure très complexe, quatre entités différentes mais connectées constituant en fait ce réservoir (Mortier 1958). La simplification ici réalisée en représentant la nappe comme un seul réservoir homogène est donc plus lourde de conséquences.

Plusieurs flux ne sont pas représentés. Les plus évidents sont la remontée capillaire depuis la nappe, le ruissellement latéral en surface, le pompage pour usage domestique, etc. Néanmoins, en termes de volume, ces flux peuvent être considérés comme négligeables par rapport aux flux représentés et leur prise en compte n'est donc pas ici indispensable.

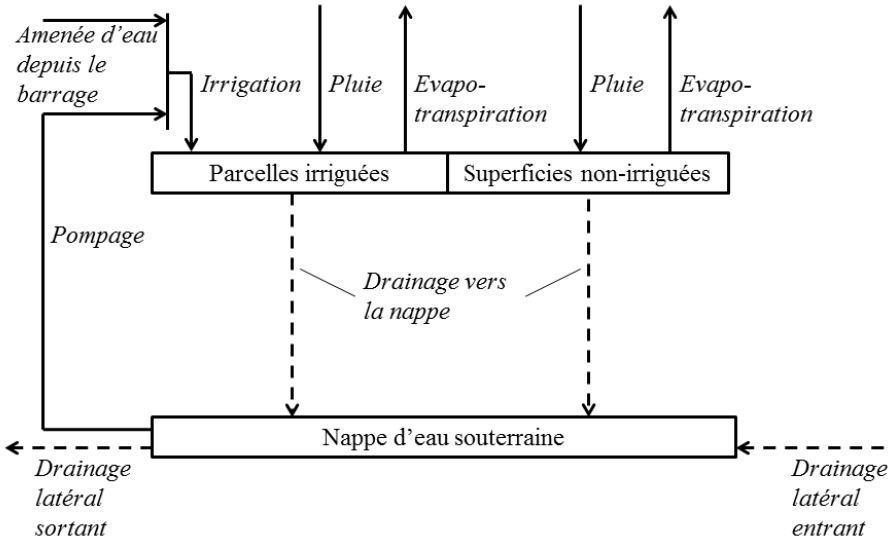


Figure 26 : Schéma du fonctionnement hydrologique de la zone d'étude. Les rectangles noirs représentent les principaux réservoirs (leur nom est écrit en caractères normaux). Les flèches représentent les directions des principaux flux (leur nom est écrit en italique). Les flèches pleines représentent les flux « de surface » (à l'air libre) tandis que les flèches pointillées représentent les flux « souterrains » (dans la matrice du sol).

Présentation du modèle

Le modèle de bilan est implémenté en utilisant l'outil Simulink du logiciel Matlab©. Il est exécuté au pas de temps mensuel pour une période allant de septembre 1995 à juin 2009. Il utilise 12 paramètres (tableau 15) et un certain nombre de données d'entrées principalement liées au climat, aux pratiques agricoles et aux niveaux piézométriques. Ses principales sorties sont le niveau piézométrique de la nappe d'eau souterraine et le débit dans le canal d'irrigation principal alimentant la zone d'étude en eau depuis le barrage.

Toutes les données nécessaires à l'exécution du modèle sont disponibles pour la zone d'étude. Une des particularités de ce modèle est en effet qu'il a été conçu spécifiquement pour ce cas d'étude et que sa construction a été réalisée sur la base des données disponibles.

Tableau 15 : Paramètres du modèle de bilan hydrique et valeurs par défaut de ces paramètres. La colonne 'gamme testée' indique les valeurs minimales et maximales que le paramètre peut prendre lors de l'analyse de sensibilité.

	Paramètre	Valeur par défaut	Gamme testée
1	Superficie d'agrumes [%]	70	40-100
2	Superficie de pommes de terre [%]	10	1-40
3	Superficie de cultures arboricoles [%]	5	1-20
4	Superficie de céréales [%]	7	1-40
5	Superficie de cultures maraichères [%]	5	1-20
6	Superficie de betteraves [%]	1	1-40
7	Proportion d'eau pompée p [%]	50	20-80
8	Distance amont D_{us} [m]	4000	2500-5500
9	Distance aval D_{ds} [m]	4000	2500-5500
10	Largeur de l'aquifère L_{WT} [m]	5300	3000-7000
11	Transmissivité de l'aquifère T [m²/s]	0.0052	0.00001-0.1
12	Coefficient d'emmagasinement e [-]	0.2	0.01-0.25

Chaque réservoir du modèle est caractérisé par un certain nombre de propriétés qui permettent, pour chaque pas de temps, de quantifier son état en fonction de son état au pas de temps précédent et de la valeur des flux y entrant et en sortant. Chaque flux est quantifié sur la base des états des réservoirs qu'il relie. Le fonctionnement des différents réservoirs et le mode de calcul des flux vont maintenant être passés en revue.

Les réservoirs

Trois réservoirs sont représentés dans le modèle : le sol des parcelles irriguées (1), le sol des superficies non-irriguées (2) et l'aquifère souterrain (3). Mathématiquement, ces réservoirs sont représentés par des variables d'état discrètes dans le temps dont l'évolution est déterminée par le principe de conservation de la masse. La valeur du stock à un pas de temps donné *t* y vaut donc la valeur du stock au temps précédent *t-1* plus les flux entrant au pas de temps donné *t* moins les flux sortant au pas de temps donné *t*.

L'état des réservoirs de surface (1) et (2) est exprimé en hauteur de lame d'eau [mm]. Cette lame d'eau est convertie en volume d'eau [m³] pour le transfert vers la nappe d'eau souterraine (3). Le volume de la nappe [m³] est ensuite converti en niveau de nappe [m] en utilisant le coefficient d'emmagasinement *e*.

Les parcelles irriguées

Le bilan hydrique du sol des parcelles irriguées est calculé en deux temps. Tout d'abord, un premier bilan hydrique provisoire est calculé en faisant l'hypothèse d'un drainage nul (équation 11).

$$\Delta S_t^* = Peff_t + I_t - ETi_t \quad \text{et} \quad S_t^* = S_{t-1} + \Delta S_t^* \tag{11}$$

avec $Peff_t$ les précipitations efficaces moyennes sur l'ensemble de la zone d'étude au temps *t* [mm], I_t l'irrigation moyenne sur l'ensemble des parcelles irriguées au temps *t* [mm], ETi_t l'évapotranspiration moyenne sur l'ensemble des parcelles irriguées au temps *t* [mm] et S_{t-1} le stock d'eau dans le réservoir (1) au temps *t-1* [mm]. Dans cette formulation, un pas de temps unitaire est implicitement considéré (Δt = *1 mois*). Au temps *t*, le stock avant drainage vaut donc S_t^* [mm]. Celui-ci est comparé à la réserve en eau utile moyenne pour l'ensemble des parcelles irriguées *REU* [mm] afin de déterminer le drainage au temps *t* pour l'ensemble des parcelles irriguées Qi_t [mm] en utilisant l'équation 12. Le stock d'eau au temps *t*, S_t [mm], peut alors être calculé (équation 13).

$$\begin{gathered} si\ S_t^* \leq REU, Qi_t = 0 \\ si\ S_t^* > REU, Qi_t = S_t^* - REU \end{gathered} \tag{12}$$

$$S_t = S_{t-1} + Peff_t + I_t - ETi_t - Qi_t \tag{13}$$

L'épaisseur de sol considérée est de 1 mètre, ce qui correspond à la profondeur racinaire moyenne des cultures. La réserve en eau utile moyenne, définie comme la différence de teneur en eau entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent, est de 11.5% volumique (*REU* = 115 mm). Cette valeur est déterminée sur la base de la méthodologie décrite dans la première section de ce chapitre.

Deux remarques méritent d'être formulées. Tout d'abord, le modèle considère que la teneur en eau est nulle au point de flétrissement permanent. L'eau du sol n'étant pas disponible pour les plantes sous cette limite et les observations effectuées sur le terrain indiquant en effet que la teneur en eau effectivement observée ne descend jamais jusqu'à une valeur aussi basse, cette hypothèse n'entrave donc en rien une représentation appropriée de la dynamique de l'eau dans ce compartiment.

Ensuite, aucune correction de l'évapotranspiration n'est effectuée en fonction de la teneur en eau du sol. En effet, les résultats obtenus précédemment montrent que, pour les parcelles irriguées, la teneur en eau n'est généralement pas assez basse pour que cet effet soit significatif. L'évapotranspiration relative est par exemple supérieure à 90% dans 64% des exploitations analysées à la section 3.1. Toutefois, cette hypothèse reste une hypothèse forte. La méthode de calcul des volumes d'eau d'irrigation appliqués, imposée par l'absence de données mesurées sur le terrain pour l'ensemble de la zone d'étude, rend malheureusement une telle prise en compte impossible.

Les parcelles non-irriguées

Le principe du bilan hydrique réalisé pour les parcelles non-irriguées est exactement le même que pour les parcelles irriguées, à deux différences près : aucune irrigation n'est pratiquée sur ces parcelles et l'évapotranspiration y est calculée différemment. La *REU* y est supposée égale à celle des parcelles irriguées.

Deux différences concernent le calcul de l'évapotranspiration. La première est la correction de l'évapotranspiration en fonction de la disponibilité en eau du sol. Les parcelles ici considérées n'étant pas irriguées, l'hypothèse de disponibilité de l'eau toujours assurée ne tient en effet plus. La seconde est l'utilisation de l'évapotranspiration de référence ET_{0_t} comme valeur d'évapotranspiration potentielle, dont le calcul est détaillé plus bas.

La correction de l'évapotranspiration en fonction de la disponibilité en eau du sol est réalisée en suivant la méthode du coefficient de stress hydrique K_s de la FAO (Allen et al. 1998). Mathématiquement, un premier stock

provisoire S'_t [mm] est calculé (équation 14). Ce stock est alors comparé à la réserve en eau facilement utilisable *RFU* [mm] moyenne pour les superficies non-irriguées, supposée constante et égale à 55% de la *REU*, afin de déterminer, au temps *t*, le coefficient de stress hydrique K_{s_t} (équation 15). L'évapotranspiration moyenne pour les parcelles non-irriguées $ETni_t$ [mm] est alors calculée au temps *t* (équation 16).

$$S'_t = S_{t-1} + Peff_t \quad \textbf{(14)}$$

$$\text{Si} \quad \begin{matrix} S'_t > (REU - RFU), & K_{s_t} = 1 \\ S'_t \leq (REU - RFU), & K_{s_t} = S'_t/(REU - RFU) \end{matrix} \quad \textbf{(15)}$$

$$ETni_t = K_{s_t} \cdot ET_{0_t} \quad \text{et} \quad S^*_t = S_{t-1} + Peff_t - ETni_t \quad \textbf{(16)}$$

Le drainage Qni_t est ensuite calculé à partir de S^*_t en suivant la même procédure que celle décrite pour les parcelles irriguées.

La nappe d'eau souterraine

Les flux entrant et sortant de ce réservoir sont initialement exprimés en volume, que ce soit les flux verticaux Qi_t, Qni_t et le pompage Ig_t ou les flux horizontaux entrant Ql_in_t et sortant Ql_out_t. Ces flux sont intégrés au stock de la nappe au moyen d'une variable d'état discrète (équation 17).

$$S_t = S_{t-1} + Qi_t + Qni_t + Ql_in_t - Ig_t - Ql_out_t \quad \textbf{(17)}$$

Ces flux sont ensuite convertis en hauteur de lame d'eau sur la base de la superficie totale de la zone d'étude puis en hauteur de niveau de nappe au moyen du coefficient d'emmagasinement de la nappe. Les données relatives à la nappe sont donc calculées aussi bien en termes de volume qu'en termes de niveau de nappe.

Les flux (transferts entre réservoir, entrées et sorties du système)

Les flux représentés dans le modèle influencent l'état des réservoirs qu'ils connectent. Ils sont en retour eux-mêmes influencés par l'état de ces réservoirs. Tous les flux sont donc connectés à au moins un des trois réservoirs.

On peut distinguer trois types de flux. Tout d'abord, les flux entrant dans le système apportent de l'eau depuis l'extérieur du système vers un réservoir et la connaissance préalable de leur valeur est donc nécessaire à l'exécution du modèle ; il s'agit des précipitations, du drainage latéral entrant et, dans une

certaine mesure, de l'irrigation. Ensuite, les flux sortant du système partent d'un réservoir et conduisent l'eau vers l'extérieur du système ; il s'agit de l'évapotranspiration et du drainage latéral sortant. Enfin, le dernier type comprend les flux qui connectent deux réservoirs entre eux et représentent donc un transfert d'eau d'un réservoir à l'autre au sein du système ; il s'agit du drainage profond et du pompage.

Le drainage profond (Qi_t et Qni_t)

La procédure de calcul du drainage profond depuis les parcelles irriguées Qi_t et depuis les superficies non-irriguées Qni_t est expliquée en détail dans les parties relatives à ces réservoirs. La différence entre les précipitations mesurées et les précipitations efficaces est également considérée comme intégralement drainée en profondeur. Tous les flux calculés dans ce modèle sont considérés comme constants durant l'intervalle du pas de temps et dépendant de l'état des réservoirs à la fin du pas de temps précédent (méthode d'Euler explicite). Le transfert des réservoirs de surface (1) et (2) vers la nappe d'eau souterraine est donc considéré comme « instantané », soit complètement accompli en moins d'un mois puisque le pas de temps d'exécution du modèle est mensuel.

Le drainage latéral entrant et sortant (Ql_in_t et Ql_out_t)

Le flux de drainage latéral entrant est calculé à partir du gradient entre le niveau de la nappe au sein du périmètre et le niveau amont $\nabla WTus_t$; la même procédure est appliquée pour le flux de drainage latéral sortant, par rapport au niveau aval $\nabla WTds_t$. Les niveaux amont et aval sont mesurés à l'aide de piézomètres plusieurs fois par an et les mesures sont interpolées linéairement pour correspondre au pas de temps du modèle. Les flux sont calculés en volume en utilisant l'équation 18.

$$Ql_in_t = \nabla WTus_t \cdot T \cdot L_{WT} \quad \text{et} \quad Ql_out_t = \nabla WTds_t \cdot T \cdot L_{WT}$$
$$\text{avec} \quad \nabla WT_{us} = \frac{Z_t - Zus_t}{D_{us}} \quad \text{et} \quad \nabla WT_{ds} = \frac{Z_t - Zds_t}{D_{ds}} \qquad \textbf{(18)}$$

où T est la transmissivité de l'aquifère [m²/s], L_{WT} la largeur de l'aquifère au niveau du périmètre [m], D_{us} la distance entre le piézomètre amont et le centre de la zone d'étude [m], D_{ds} la distance entre le piézomètre aval et le centre de la zone d'étude [m], Z_t le niveau absolu de la nappe au centre de la zone d'étude [m] et Zus_t et Zds_t les niveaux absolus de la nappe aux piézomètres amont et aval respectivement [m].

Les précipitations

Les précipitations sont exprimées en mm. Elles sont mesurées *in situ* par des stations météo et sont entrées telles quelles dans le modèle. Etant donnés les caractéristiques topographiques (relief très plat) et les aménagements réalisés (parcelles irriguées, souvent par voie gravitaire et équipées de dispositifs visant à retenir les eaux ruisselées sur la parcelle), le ruissellement d'eau de pluie sortant de la zone d'étude ou entrant dans la zone d'étude peut être considéré comme négligeable.

Au sein du modèle, les précipitations efficaces $Peff_t$ sont alors déterminées en utilisant la procédure USDA-SCS décrite par Raes et al. (2015), selon laquelle $Peff_t'=(0.70917.P_t^{0.82416}-0.11556).10^{0.02426ETc_t'}$ avec $Peff_t'$ les précipitations efficaces mensuelles [pouces], P_t' les précipitations mensuelles mesurées [pouces] et ETc_t' l'évapotranspiration mensuelle des cultures [pouces]. La différence entre les précipitations mesurées et les précipitations efficaces est considérée comme directement drainée.

L'évapotranspiration

Seules les données de température sont disponibles. L'évapotranspiration de référence ET_{0_t} [mm] est donc calculée en utilisant la relation de Hargreaves ($ET_{0_t}=0.0023.Ra_t(TC_t+17.8).TR_t^{0.5}$ avec $TC_t=(T_{max_t}+T_{min_t})/2$ où T_{max_t} est la température quotidienne maximum moyenne, T_{min_t} la température quotidienne minimum moyenne, $TR=T_{max_t}-T_{min_t}$ et Ra_t le rayonnement extra-terrestre mensuel (Hargreaves and Allen 2003)).

Sur les parcelles irriguées, l'évapotranspiration $ETi_t = K_{c_t} . ET_{0_t}$ où K_{c_t} est le coefficient cultural moyen (pondéré par la surface des différentes cultures) de la zone d'étude (méthode du *single crop coefficient* décrite par Allen et al. (1998). Le coefficient de stress hydrique K_s est supposé toujours égal à 1.

Sur les parcelles non-irriguées, l'évapotranspiration $ETni_t = K_{s_t} . ET_{0_t}$. Le coefficient cultural K_c est en effet très difficile, voire impossible, à caractériser étant donnée la variabilité d'occupation rencontrée sur cette zone. Il est donc supposé toujours égal à 1. Cette hypothèse s'explique par le fait qu'une partie non négligeable des superficies non-irriguées est couverte par des routes, des chemins, des surfaces d'eau, des habitations, des fossés, des canaux d'irrigation, etc. Caractériser une valeur de coefficient cultural K_c pour ces superficies est hasardeux et, dès lors, l'hypothèse est faite que la demande évapotranspirative de ces surfaces ne dépend que des conditions météorologiques.

Le coefficient de stress hydrique K_{s_t} y est caractérisé à l'aide de la procédure décrite dans la section consacrée à la description du fonctionnement de ce réservoir (2).

L'irrigation

Le calcul de l'irrigation commence par l'irrigation totale. Plus tôt dans ce chapitre, l'approche *ESR* a permis d'identifier une relation entre certaines caractéristiques de l'exploitation (l'instabilité du statut foncier SF_{expl}, la taille de l'exploitation TF_{expl} et le niveau de spécialisation Sp_{expl}) et l'*efficience de l'irrigation*, calculée sur une base annuelle par $\eta = \frac{\sum ET_t - \sum P_t^*}{\sum I_t}$ (équation 5) où, pour rappel, η est l'*efficience de l'irrigation*, propre à chaque exploitation, ET_t l'évapotranspiration des cultures (ici l'évapotranspiration potentielle puisque le stress hydrique est supposé nul) et P_t^* les précipitations (ici les précipitations efficaces). L'irrigation totale I_t est ici calculée sur la base de cette *efficience* η en réorganisant simplement l'ordre des termes de l'équation 1 (équation 19).

$$I_t = \frac{NIWR_t}{\eta_{CMV}} \quad \textbf{(19)}$$

où $NIWR_t = ETi_t - P_t$ et η_{CMV} est l'*efficience de l'irrigation* moyenne (pondérée par la surface) du périmètre, η étant calculé pour chaque parcelle du périmètre sur base de ses caractéristiques propres ($\eta_{cmv} = \frac{\sum_{expl=1}^{n}[\eta_{expl}.TF_{expl}]}{\sum_{expl=1}^{n} TF_{expl}}$ avec n le nombre de parcelles au sein du périmètre). Le calcul de η_{expl} est décrit plus loin (équations 20 et 21).

Cette méthode de calcul implique une hypothèse forte. η est, comme expliqué plus haut, calculé sur une base annuelle et donc basé sur la somme annuelle des flux I_t et Qi_t. Cet indice n'est donc *a priori* pas valable à l'échelle de l'événement d'irrigation. La méthode utilisée pour calculer I_t fait pourtant implicitement cette hypothèse. En d'autres mots, cette méthode considère que les pertes d'eau d'irrigation par drainage sont uniformément réparties dans le temps, dans les mêmes proportions pour chaque événement d'irrigation.

Enfin, l'irrigation totale I_t est fixée à *0* durant les mois de décembre et janvier. L'état du stock n'intervenant pas dans le calcul de $NIWR_t$, le fait de considérer que $I_t = NIWR_t/\eta_{cmv}$ au mois de février constitue donc une approximation. Cela n'est en effet vrai que si $\Delta S_t = 0$, ce qui est faux entre le mois de janvier et le mois de février, l'irrigation permettant à ce moment de

combler un éventuel déficit hydrique survenu durant les mois d'hiver. Les valeurs de η observées sont toutefois telles que la sur-irrigation permet aisément de saturer le sol en un mois et que, le reste du temps, le sol est en permanence à la capacité au champ lorsque les calculs sont basés sur un bilan mensuel. En conséquence, l'irrigation I_t et le drainage Qi_t pourraient être légèrement sous-estimés au mois de février.
L'irrigation totale I_t est ensuite scindée entre irrigation depuis le barrage Id_t et irrigation depuis la nappe d'eau souterraine Ig_t sur la base d'un ratio constant p ($I_t = p.Ig_t + (1-p).Id_t$). Ce coefficient p est un des paramètres du modèle (tableau 15).

Les données
Les principales données nécessaires à l'exécution du modèle sont les données météorologiques utilisées pour le calcul de ET_0 et les données de précipitation, les valeurs de K_c des différentes cultures, les données nécessaires au calcul de l'*efficience de l'irrigation* et les niveaux de la nappe d'eau souterraine en amont et en aval de la zone d'étude. Ces données sont décrites en détail dans la section 2.2 de ce document.

Les données météorologiques
Les données météorologiques (températures minimales et maximales) et les données de précipitation utilisées sont celles décrites à la section 2.2. Elles sont directement disponibles auprès de l'administration responsable de la gestion du périmètre irrigué (ORMVAM). Les données de rayonnement extra-terrestre sont calculées sur une base quotidienne en utilisant la méthode décrite par la FAO (Allen et al. 1998). Elles sont ensuite sommées afin d'obtenir la valeur mensuelle.

Les données agronomiques
Les valeurs de K_c des différentes cultures sont, elles aussi, obtenues *via* la méthode décrite par la FAO (Allen et al. 1998). Six cultures sont considérées : agrumes, betteraves, pommes de terre, céréales, nèfles, tomates. Les valeurs pour les nèfles n'étant pas disponibles, leur K_c est supposé égal à celui des agrumes, autre culture arboricole pratiquée dans la zone d'étude. Les valeurs de K_c sont calculées sur une base quotidienne à partir des valeurs pivots renseignées par la FAO et des données climatiques moyennes (tableau 16). Ces valeurs sont ensuite moyennées pour obtenir les valeurs mensuelles. Les dates de semis et de récolte des différentes cultures sont supposées constantes d'une année à l'autre et d'un agriculteur à l'autre.

Tableau 16 : Dates pivots et valeurs de K_c leur correspondant pour les cultures considérées dans le modèle. Ces valeurs sont tirées de tables de références (K_c table), corrigées en fonction des données climatiques moyennes (K_c corrigé) puis, entre ces dates, les valeurs de K_c sont déterminées par interpolation linéaire (Source pour les valeurs de K_c et la méthodologie : Allen et al. (1998)).

	Semis/ $K_{c\ ini}$	**Début de croissance**	**Pleine croissance** Début	Fin	**Récolte/** $K_{c\ fin}$
Agrumes					
(date)	(4/11)	(1/01)	(30/05)	(29/07)	(4/11)
K_c (table)/K_c (corrigé)	0.7 / 0.735	0.7 / 0.735	0.65 / 0.718	0.65 / 0.718	0.7 / 0.735
Pommes de terre					
(date)	(19/02)	(11/03)	(8/04)	(6/05)	(3/06)
K_c (table)/K_c (corrigé)	0.5 / 0.6	0.5 / 0.6	1.15 / 1.183	1.15 / 1.183	0.75 / 0.782
Betteraves					
(date)	(7/10)	(11/11)	(29/01)	(8/04)	(6/05)
K_c (table)/K_c (corrigé)	0.35 / 0.6	0.35 / 0.6	1.2 / 1.235	1.2 / 1.235	1 / 1.031
Céréales					
(date)	(9/12)	(23/12)	(6/05)	(27/05)	(17/06)
K_c (table)/K_c (corrigé)	0.7 / 0.6	0.7 / 0.6	1.15 / 1.187	1.15 / 1.187	0.3 / 0.341
Tomates					
(date)	(25/03)	(22/04)	(17/06)	(22/07)	(2/09)
K_c (table)/K_c (corrigé)	0.6 / 0.6	0.6 / 0.6	1.15 / 1.197	1.15 / 1.197	0.8 / 0.847

Les niveaux piézométriques

Les niveaux amont et aval de la nappe d'eau souterraine sont disponibles auprès de l'agence de gestion du bassin hydraulique de la Moulouya (ABHM) pour un certain nombre de piézomètres (figure 27). Sur la base de leur positionnement géographique, le piézomètre le plus évident à utiliser pour le niveau piézométrique amont est le piézomètre 1510/7. Toutefois, en raison du gradient très important en aval de ce piézomètre, il est opportun de corriger ces valeurs afin d'obtenir le niveau piézométrique à la réelle limite amont de la zone d'étude. Les piézomètres 1016/7 et 1221/7 se trouvaient, en 1995, au même niveau piézométrique que la limite amont de la zone d'étude. Sur la base des valeurs historiques, les niveaux piézométriques des piézomètres 1016/7 et 1221/7, très bien corrélés (figure 28a), montrent un décalage moyen de 56.3 m avec le piézomètre 1510/7 (figure 28b). Le niveau piézométrique amont est donc estimé par la valeur moyenne entre la valeur mesurée au piézomètre 1016/7, celle mesurée au piézomètre 1221/7 et celle mesurée au piézomètre 1510/7 à laquelle 56.3 m ont été soustraits. Une série chronologique continue étant nécessaire à l'exécution du modèle, ces

données ont été interpolées linéairement pour les pas de temps pour lesquels aucune mesure n'était disponible.

Le niveau piézométrique aval peut être obtenu à partir des piézomètres 1009/7 et 1269/7. Sur la base des données historiques, un décalage de 7.55 m est observé entre ces deux piézomètres (figure 29a). La position du piézomètre 1009/7 étant plus centrale, celui-ci a été utilisé comme référence et le niveau piézométrique amont est défini comme la valeur moyenne entre la valeur mesurée au piézomètre 1009/7 et celle mesurée au piézomètre 1269/7 à laquelle 7.55 m ont été soustraits. Une série chronologique continue étant ici aussi nécessaire, ces données ont été interpolées par régression linéaire pour les pas de temps pour lesquels aucune mesure n'était disponible.

Enfin, le niveau piézométrique au sein de la zone d'étude est mesuré au niveau du piézomètre 1007/7. Malheureusement, les données pour ce piézomètre ne sont disponibles que jusqu'octobre 1999. Ces données étant utilisées pour la calibration du modèle, il est opportun de les avoir pour l'ensemble de la période de simulation, soit jusque juin 2009. Pour la période antérieure à 1999, une très bonne corrélation est observée entre le niveau mesuré pour ce piézomètre et celui mesuré pour un autre piézomètre, situé un peu plus de 10 km plus loin, le piézomètre 1017/7 (figure 29b). Le piézomètre 1007/7 étant incontestablement le piézomètre de référence, les données du piézomètre 1017/7 ont été modifiées sur la base de l'équation de la droite de régression pour la période de modélisation. Les données de calibration sont donc composées à la fois des données mesurées au piézomètre 1007/7 et des données mesurées au piézomètre 1017/7 modifiées.

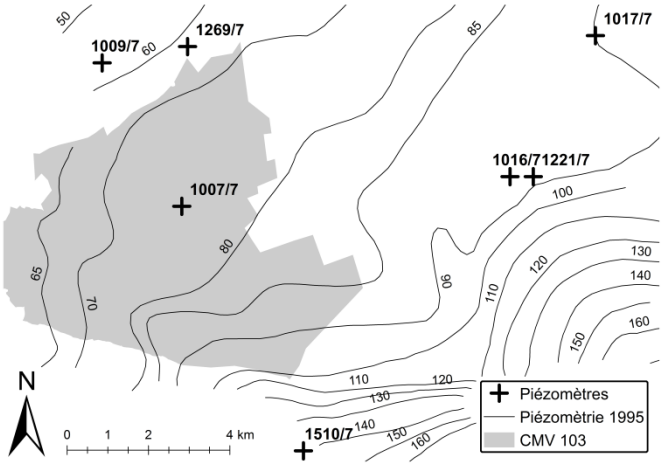
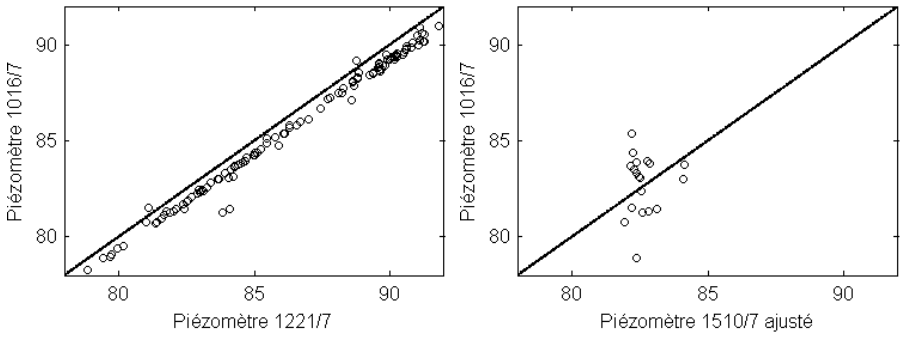
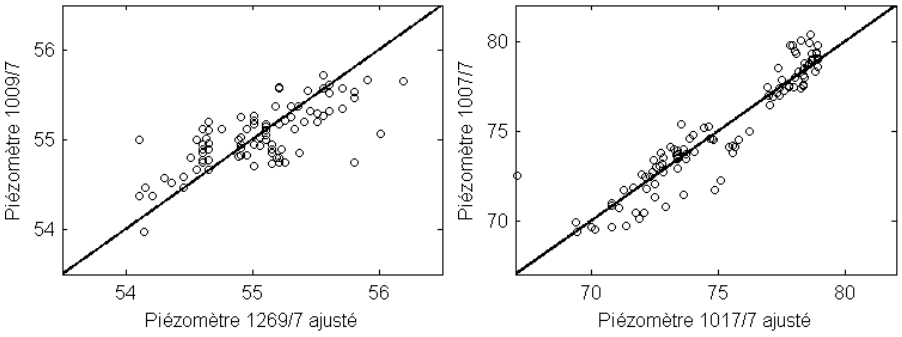


Figure 27 : Disposition des piézomètres utilisés par rapport à la zone d'étude et piézométrie moyenne de l'année 1995 (données : ABHM 2013).



(a) (b)

Figure 28 : Relation entre les niveaux des piézomètres 1221/7 et 1016/7 (a) et les niveaux des piézomètres 1510/7 auxquels 56.3 m ont été soustraits et 1016/7 (b). La droite représentée sur les figures est la droite 1:1.



(a) (b)

Figure 29 : Relation entre les niveaux des piézomètres 1269/7 auxquels 7.55 m ont été soustraits et 1009/7 (a) et les niveaux des piézomètres 1017/7 modifiés (niveau représenté = niveau mesuré*0.7401+11.0357) et 1016/7 (b). La droite représentée sur les figures est la droite 1:1.

Les données nécessaires au calcul de l'*efficience de l'irrigation*

Enfin, les données nécessaires au calcul de l'*efficience de l'irrigation* à partir des résultats de l'approche *ESR* implémentée dans la section précédente sont la taille de l'exploitation, le taux de spécialisation et la stabilité du statut foncier et sont requises pour toutes les exploitations de la zone d'étude.

La taille des exploitations et le taux de spécialisation ont été dérivés des données d'un recensement agricole réalisé en 2009-2010 obtenues auprès de l'administration responsable de la gestion du périmètre irrigué (ORMVAM). Ils sont supposés constants pour l'ensemble de la période de simulation. La stabilité du statut foncier, donnée dont dispose également cette administration, n'a par contre jamais pu être obtenue. Cette donnée étant indispensable au calcul de l'*efficience de l'irrigation* d'après les résultats de l'approche *ESR*, son calcul n'a jamais pu être réalisé.

Les données disponibles permettent toutefois d'estimer l'efficience de l'irrigation sur la base des corrélations mises en évidence dans la première section de ce chapitre. Pour rappel, ces corrélations mettent en lien l'*efficience de l'irrigation* avec le type d'irrigation, la culture pratiquée, la taille de l'exploitation et le rapport entre la superficie plantée avec des agrumes et la taille officielle de l'exploitation (ici appelée « proportion d'agrumes ») (équations 20 et 21).

$$\eta = \eta_t \cdot e_u \quad \textbf{(20)}$$

$$e_u = \begin{cases} 127.2 & \text{pour les cultures de nèfles et de céréales} \\ 164.9789 \cdot [\text{pa}^{1.2943}] & \text{pour les cultures d'agrumes (irrigation gravitaire)} \\ 34.8826 \cdot \log_{10}(tf) + 31.5012 & \text{pour les cultures irriguées au goutte-à-goutte} \end{cases} \quad \textbf{(21)}$$

avec *pa* la proportion d'agrumes [-], *tf* la taille de l'exploitation [ha] et η_t l'*efficience technique* moyenne (57.5% pour l'irrigation gravitaire et 82.5% pour l'irrigation goutte-à-goutte).

Toutes ces données, à l'exception du type d'irrigation, peuvent être dérivées des données disponibles dans le recensement agricole. Le type d'irrigation a quant à lui été obtenu pour toutes les exploitations sur la base de la liste des subsides à la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte octroyés par l'ORMVAM. Les agriculteurs ayant adopté la technologie goutte-à-goutte sans demander les subsides ne sont dès lors pas identifiés. Ce phénomène n'est cependant apparu que très récemment et, la période de simulation prenant fin en 2009, l'impact de cette approximation est vraisemblablement limité.

Le calcul de l'*efficience de l'irrigation* n'a donc finalement pas pu être réalisé selon la méthode préconisée et ce car les données nécessaires n'ont jamais été reçues. L'utilisation de la corrélation ici décrite, loin d'être optimale, permet néanmoins une estimation de cette efficience sur la base des données effectivement disponibles.

Calibration du modèle

Les principales sorties du modèle sont le niveau de la nappe d'eau souterraine et le débit dans le canal d'amenée d'eau du barrage. Ces deux valeurs peuvent être mesurées *in situ* et ces mesures peuvent donc être utilisées comme valeur de référence pour construire une fonction objectif à partir de laquelle le modèle peut être calibré.

Par ailleurs, la plupart des 12 paramètres du modèle (tableau 15) peuvent également être estimés et une valeur par défaut peut leur être donnée. Cette connaissance *a priori* des valeurs approximatives des paramètres permet de simplifier le processus de calibration. Une analyse de sensibilité permet en effet d'identifier les paramètres qui influencent sensiblement les sorties du modèle et, dès lors, de n'implémenter la procédure de calibration que sur ces

paramètres sensibles, la valeur par défaut étant alors attribuée aux paramètres identifiés comme peu sensibles.

La mesure de la sensibilité présentée par Morris (1991) est une mesure simple qui peut être facilement implémentée et qui intègre les interactions entre paramètres. Le principe de base consiste à calculer, pour chaque paramètre, un certain nombre de rapports incrémentiels, les effets élémentaires, qui sont ensuite moyennés pour évaluer l'importance globale du paramètre. Deux indicateurs de sensibilité sont alors obtenus : μ, qui évalue l'influence globale du paramètre sur les sorties, et σ, qui évalue sa non-linéarité ou son interaction avec les autres paramètres (Campolongo et al. 2007). Le calcul de ces indicateurs a, par la suite, été affiné mais leur interprétation reste identique à la méthode originale. Combinée à une technique d'échantillonnage des incréments de type carré latin, cette méthode est généralement appelée LH-OAT (*Latin Hypercube – One at A Time*) (Sellami 2014).

La sensibilité du modèle est évaluée pour différentes sorties (niveau de la nappe d'eau souterraine à différents moments, variance du niveau de la nappe, débit maximum dans le canal d'amenée d'eau depuis le barrage, variance du débit dans ce canal…). De cette manière, tous les paramètres potentiellement significatifs sont identifiés et le processus de calibration peut être implémenté sur ces paramètres uniquement.

Le processus de calibration est classiquement réalisé en minimisant une fonction objectif à l'aide d'un algorithme d'optimisation local. Pour plus de sécurité, cet algorithme est exécuté plusieurs fois en partant de valeurs initiales différentes afin de s'assurer que l'optimum atteint est un minimum global. Trois fonctions objectif différentes sont utilisées : la première minimise la somme des carrés des résidus entre les niveaux de la nappe d'eau souterraine mesurés et modélisés, la seconde minimise la somme des carrés des résidus entre les débits dans le canal d'amenée d'eau depuis le barrage mesurés et modélisés et la troisième combine ces deux mesures en normalisant les valeurs obtenues afin que leur agrégation ait un sens (elles sont centrées sur leur moyenne et réduites par rapport à leur écart type avant agrégation de manière à ce que la moyenne et l'écart type des valeurs sommées soient égales).

Présentation des résultats

Bien que les valeurs par défaut des paramètres du modèle, présentées au tableau 15, aient un sens physique et soient estimées sur la base d'observations réalisées ou de valeurs trouvées dans la littérature,

l'exécution du modèle avec ces valeurs de paramètres donne d'assez mauvais résultats (figure 30). Ces mauvais résultats justifient à eux seuls l'implémentation de l'analyse de sensibilité et de la procédure de calibration.

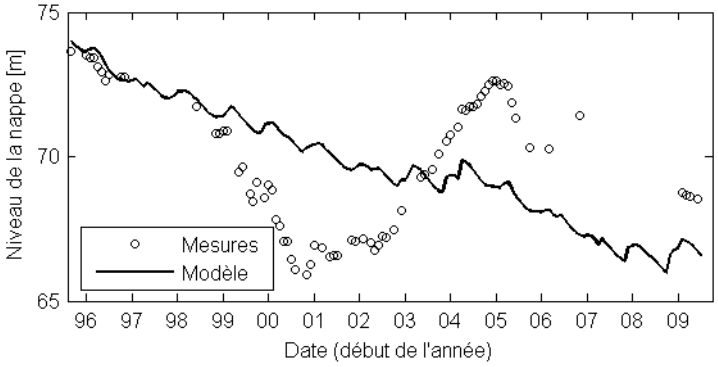


Figure 30 : Evolution mesurée et modélisée du niveau de la nappe d'eau souterraine de septembre 1995 à juin 2009 avec les valeurs de paramètres par défaut présentées au tableau 15.

L'analyse de sensibilité permet de mettre en évidence les paramètres les plus influents sur les sorties du modèle. La sensibilité du modèle aux paramètres a été testée pour les gammes de valeur indiquées au tableau 15. Lorsque l'effet sur le niveau de la nappe d'eau souterraine est étudié, les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible sont, sans surprise, la proportion d'eau pompée p (paramètre 7), la transmissivité de l'aquifère T (paramètre 11) et son coefficient d'emmagasinement e (paramètre 12) (figure 31). Lorsque l'effet sur le débit dans le canal d'amenée d'eau du barrage est étudié, un seul paramètre est cette fois très influent (figure 32). Il s'agit de la proportion d'eau pompée p (paramètre 7). La sensibilité de ces trois paramètres est par ailleurs assez variable, comme le montre leur valeur de σ élevée, ce qui pourrait refléter de possibles interactions avec d'autres paramètres.

Les sorties du modèle s'avérant très peu sensibles aux valeurs des 9 autres paramètres, leur valeur par défaut leur sera attribuée. Seuls les trois paramètres identifiés comme influant significativement les sorties du modèle seront calibrés.

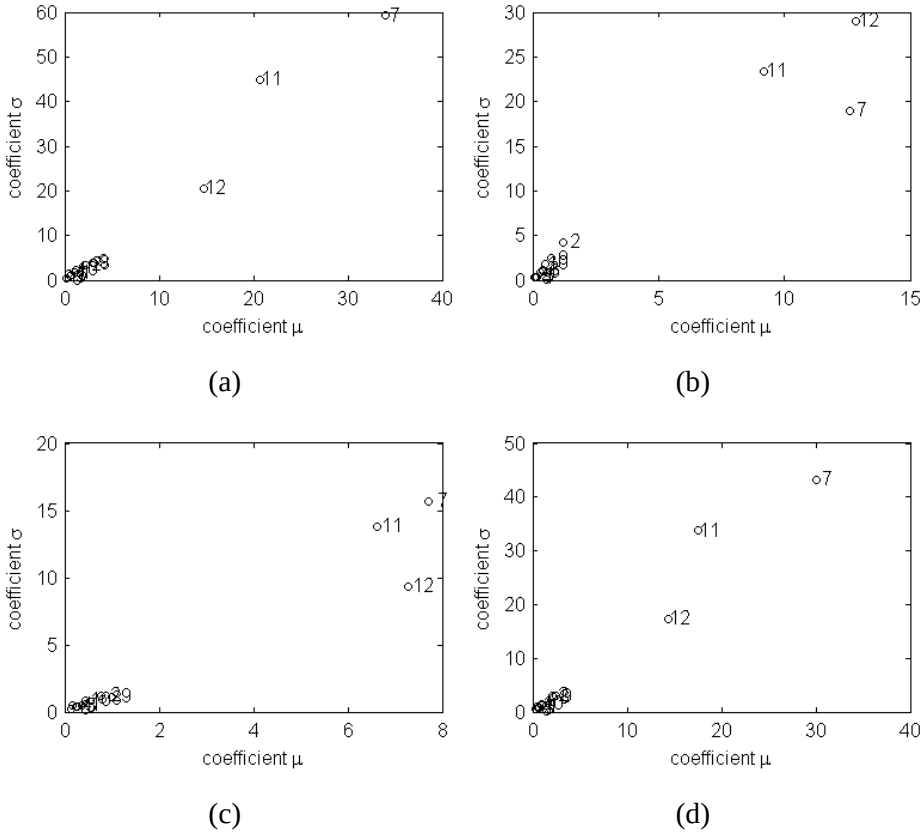
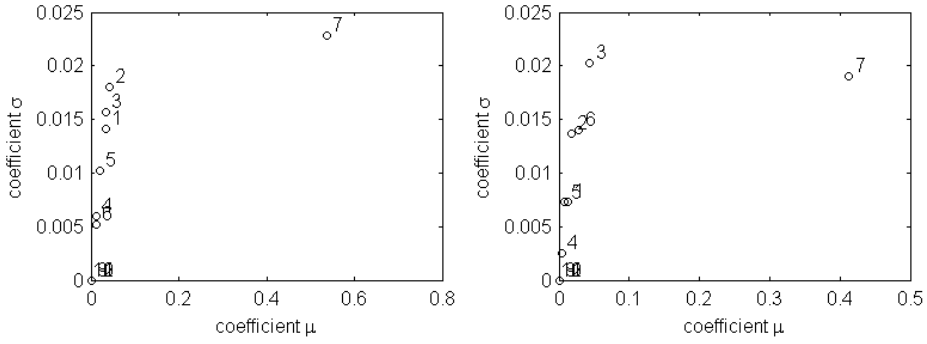


Figure 31 : Résultats de l'analyse de sensibilité réalisée sur le niveau minimum de la nappe (a), sur le niveau maximum de la nappe (b), sur la variation (écart type) du niveau de la nappe (c) et sur le niveau de la nappe après 100 mois de simulation (d). Une valeur de μ élevée indique une influence forte du paramètre sur la sortie et une valeur de σ élevée indique une forte dépendance de l'influence du paramètre à celle des autres paramètres. Le chiffre indiqué renvoie au numéro de paramètre décrit au Tableau 15.

Le processus de calibration est implémenté pour trois fonctions objectif différentes : la somme des carrés des résidus entre les niveaux de la nappe d'eau souterraine mesurés et modélisés, la somme des carrés des résidus entre les débits dans le canal d'amenée d'eau depuis le barrage mesurés et modélisés et une combinaison de ces deux mesures. Les résultats obtenus varient fortement selon la fonction objectif utilisée et leur interprétation est donc délicate (tableau 17).



(a) (b)

Figure 32 : Résultats de l'analyse de sensibilité réalisée sur le débit moyen (a) et la variation (écart type) du débit (b) du canal d'amenée d'eau du barrage. Une valeur de μ élevée indique une influence forte du paramètre sur la sortie et une valeur de σ élevée indique une forte dépendance de l'influence du paramètre à celle des autres paramètres. Le chiffre indiqué renvoie au numéro de paramètre décrit au Tableau 15.

Tableau 17 : Résultats de la procédure de calibration pour différentes fonctions objectif. La première colonne indique la fonction objectif utilisée pour l'optimisation, la colonne *SCR(WT)* indique le résultat de l'application des coefficients obtenus en terme de somme des carrés des résidus entre les niveaux de la nappe d'eau souterraine mesurés et modélisés ($\Sigma((WT_{mod}-WT_{mes})^2)$), la colonne *SCR(Q)* fait de même pour la somme des carrés des résidus entre les débits dans le canal d'amenée d'eau depuis le barrage mesurés et modélisés ($\Sigma((Q_{mod}-Q_{mes})^2)$) et la colonne $\Delta\Sigma Q$ indique la différence entre la somme des débits modélisés et la somme des débits mesurés dans ce même canal ($\Sigma Q_{mod}-\Sigma Q_{mes}$). La mention *indét.* indique que la valeur du coefficient est sans influence sur la valeur de la fonction objectif et que la valeur de ce coefficient est donc indéterminée.

Optimisation	***p* [%]**	***T* [m²/s]**	***e* [%]**	***SCR(WT)* [m²]**	***SCR(Q)* [(m³/s)²]**	**$\Delta\Sigma Q$ [Σm³/s]**
Niveau de la nappe *SCR(WT)*	41.9	0.0023	5.2	159	36	-32
Débit dans le canal *SCR(Q)*	69.6	indét.	indét.	indét.	indét.	indét.
SCR(WT) + *SCR(Q)* (centrés & réduits)	561.6	0.00001	0.25	435	18	0.1
$\Sigma Q_{mesuré} - \Sigma Q_{modélisé}$ ($\Delta\Sigma Q$)	61.5	indét.	indét.	indét.	indét.	indét.
SCR(WT) (*p* figé à 69.6%)	69.6	0.00001	25	703	16	13
SCR(WT) (*p* figé à 61.5%)	61.5	0.00001	25	435	18	<0.1

L'optimisation utilisant la minimisation de la somme des carrés des résidus entre les niveaux de la nappe mesurés et modélisés *SCR(WT)* donne des résultats intéressants quant au niveau de la nappe. Si le modèle est alors loin

de représenter parfaitement l'évolution fine de ce niveau, l'évolution du niveau modélisé étant trop marquée par les cycles saisonniers en raison de la mauvaise représentation de la dynamique de transfert surface-nappe dans le modèle, la dynamique à long terme semble respectée, avec un cycle de diminution-augmentation-diminution-augmentation du niveau (figure 33a). A l'inverse, les paramètres obtenus par optimisation conjointe des sommes des carrés des résidus centrés réduits entre les niveaux de nappe mesurés et modélisés d'une part et entre les débits dans le canal d'amenée d'eau d'irrigation mesurés et modélisés d'autre part *SCR(WT)+SCR(Q)* donnent une très mauvaise cohérence entre les niveaux de la nappe mesurés et modélisés, tant au niveau des valeurs ponctuelles que de la dynamique générale (figure 33b). Au niveau des débits modélisés, les deux combinaisons de paramètres donnent des dynamiques générales similaires, qui représentent toutes deux assez mal la dynamique réellement observée (figures 33c et 33d). La principale différence se situe dans la valeur des débits maximaux observés, qui s'approchent de 1.4 m^3/s dans le premier cas tandis qu'ils ne dépassent jamais 0.9 m^3/s dans le second.

Si la première combinaison de paramètres permet donc de représenter la dynamique d'évolution du niveau de la nappe d'eau souterraine, aucune combinaison ne semble à même de représenter la dynamique d'évolution du débit du canal d'amenée d'eau d'irrigation. Une modification du modèle consistant à définir le débit du canal d'amenée d'eau d'irrigation comme une entrée du modèle, la seule sortie étant alors le niveau de la nappe, ne permet pas non plus de représenter correctement l'évolution de ce niveau (figure 34).

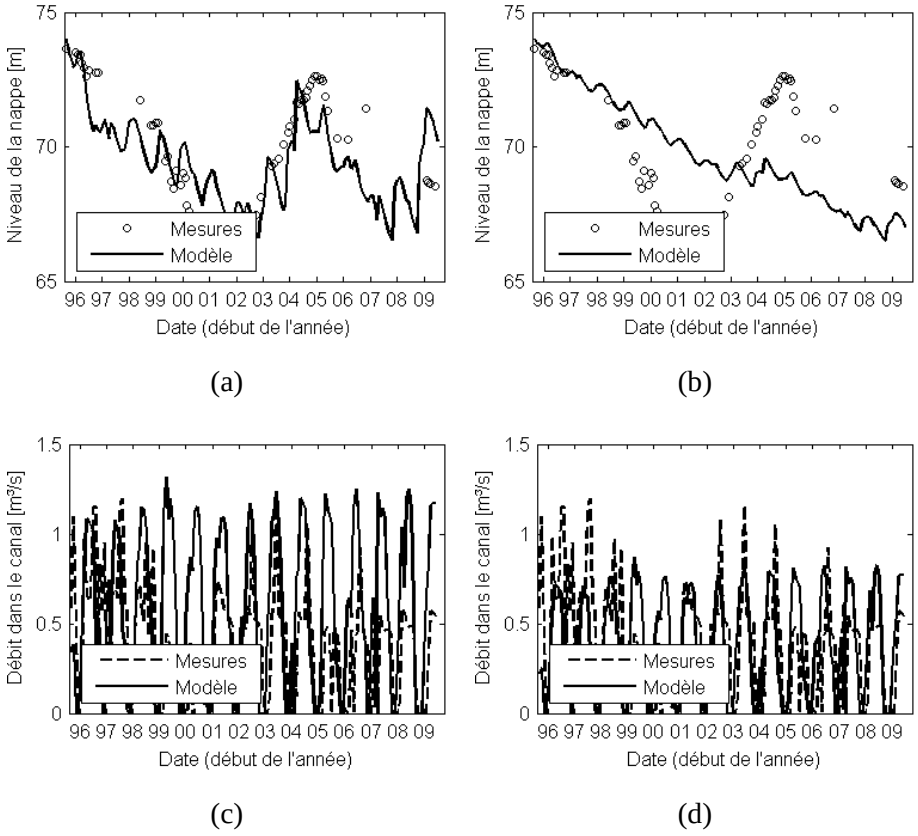


Figure 33 : Niveaux de nappe mesurés et modélisés avec les paramètres obtenus par optimisation du niveau de la nappe (*SCR(WT)*) (a) et par optimisation du niveau de nappe et du débit dans le canal d'irrigation (*SCR(WT) + SCR(Q)*) (b) et débits dans le canal mesurés et modélisés avec les paramètres obtenus par optimisation du niveau de la nappe (*SCR(WT)*) (c) et par optimisation du niveau de nappe et du débit dans le canal d'irrigation (*SCR(WT) + SCR(Q)*) (d).

Par rapport au niveau de la nappe, la meilleure combinaison de paramètres est donc, sans surprise, celle obtenue avec la fonction objectif *SCR(WT)*. Par rapport au débit dans le canal d'amenée d'eau, l'utilisation d'une fonction objectif différente n'apporte rien en terme de dynamique et est donc inutile pour la présente analyse ; les analyses relatives au débit dans ce canal se feront donc sur la base des débits mesurés.

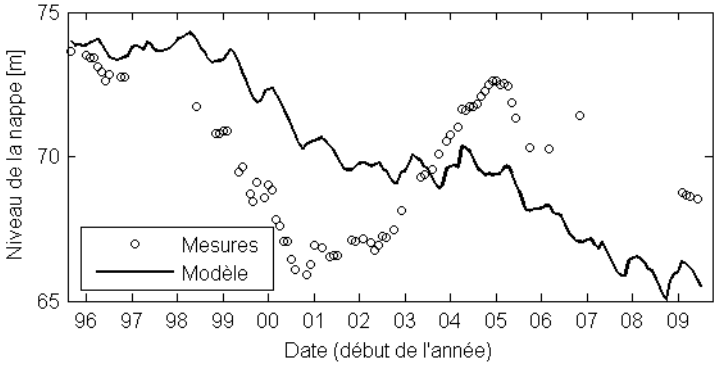
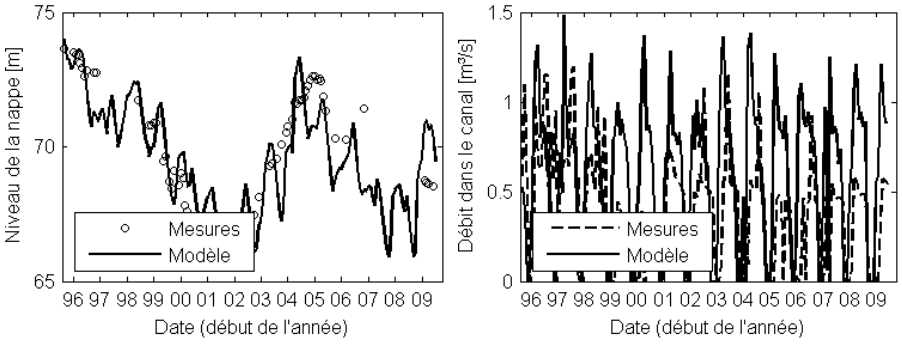


Figure 34 : Niveaux de nappe mesurés et modélisés pour un modèle modifié dans lequel le débit mesuré dans le canal d'amenée d'eau d'irrigation est une donnée d'entrée. Pour ce même modèle, la distinction entre débit observé et débit modélisé n'a aucun sens.

Une modification intéressante consiste à faire varier le paramètre p (la proportion d'eau d'irrigation pompée dans la nappe) en fonction d'un indice d'aridité, défini comme le rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration de référence. Ce facteur est alors calculé par $p_t=c_1+c_2(P_t/ET_{0_t})$, c_1 et c_2 étant des paramètres de régression obtenus par calibration. Les valeurs de p_t obtenues sont *a posteriori* bornées entre 0 et 1 pour que le bilan de masse soit respecté : toutes les valeurs inférieures à 0 sont remontées à 0 et toutes les valeurs supérieures à 1 sont descendues à 1.



(a) (b)

Figure 35 : Niveaux de nappe mesurés et modélisés avec les paramètres obtenus par optimisation du niveau de la nappe (*SCR(WT)*) (a) et débits dans le canal mesurés et modélisés avec les paramètres obtenus par optimisation du niveau de la nappe (*SCR(WT)*) (b) pour le modèle faisant intervenir un facteur *p* variable.

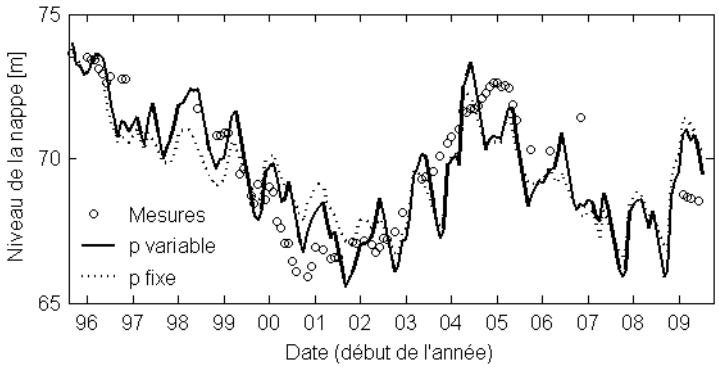


Figure 36 : Evolution des niveaux de la nappe mesurés (cercles), modélisés avec le facteur *p* fixe (trait pointillé) et modélisés avec le facteur *p* variable (trait plein).

Un tel modèle est intéressant car, une fois optimisée, la valeur de la fonction objectif *SCR(WT)* vaut 121.6 m², ce qui est mieux que le modèle avec le facteur *p* fixe (figure 35a). La transmissivité vaut alors 0.0036 m²/s et le coefficient d'emmagasinement 4.8%. Le facteur *p* varie quant à lui entre 0 et 56.2% pour une valeur moyenne de 24.7%. En termes de volumes par contre, 40.2% de l'eau d'irrigation est alors pompée, une valeur très proche de celle observée pour un facteur *p* fixe (41.9%). La différence entre ce rapport de volume (40.2%) et la valeur moyenne du paramètre (24.7%) s'explique par le fait que le paramètre *p* variable prend de faibles valeurs

lorsque les précipitations sont importantes, c'est-à-dire quand l'irrigation est faible.
L'évolution du niveau de la nappe représentée par un tel modèle montre que l'apport du facteur *p* variable reste toutefois limité (figure 36). Visuellement, la tendance est très similaire mais la saisonnalité est plus marquée encore avec le modèle impliquant un facteur *p* variable. La différence moyenne entre les niveaux donnés par ces deux modèles est de 54 cm et la différence maximale est de 2 m (en juin 1998).

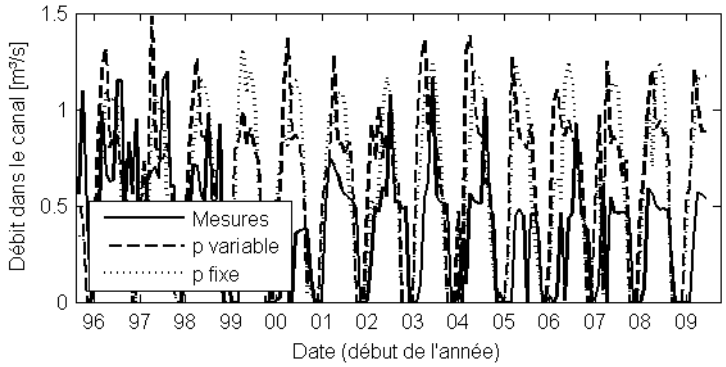


Figure 37 : Evolution du débit dans le canal mesuré (trait plein), modélisés avec le facteur *p* fixe (tirets) et modélisés avec le facteur *p* variable (trait pointillé).

La représentation du débit dans le canal n'est pas améliorée par l'implémentation d'un facteur *p* variable (figures 35b et 37). Les valeurs des deux fonctions objectif relatives à ce débit valent 37 [(m³/s)²] pour *SCR(Q)* et -35 [Σ(m³/s)] pour *ΔΣQ*. Cela est moins bien qu'avec le facteur *p* fixe, avec lequel ces valeurs valent respectivement 36 et -32 (tableau 17). Le modèle, quelles que soient les modifications apportées, apparait donc ici trop grossier pour représenter valablement à la fois la variation du niveau de la nappe et celle du débit du canal d'amenée d'eau d'irrigation.

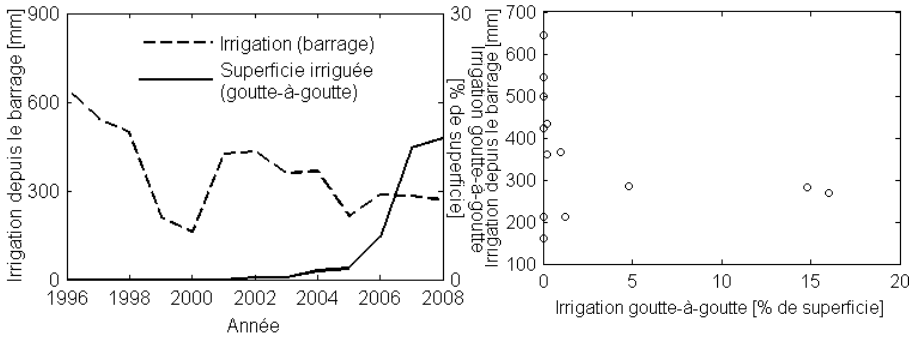
Analyse des résultats

Apports d'eau depuis le barrage

Le modèle ici présenté semble incapable de représenter correctement l'évolution du débit d'eau d'irrigation provenant du barrage (figure 33c). Le cycle saisonnier, visible sur les données mesurées aussi bien que sur les

sorties du modèle, est assez bien représenté mais il en va tout autrement pour les valeurs de débit instantané et les volumes apportés par saison. La raison de cette mauvaise représentation est assez simple à identifier. Le modèle détermine ces débits sur la base de la demande en eau d'irrigation. Or, dans les faits, ces apports d'eau sont essentiellement régis par l'offre, c'est-à-dire la disponibilité au niveau du barrage. Bien que les règles de gestion officielles du barrage réfèrent aussi bien à l'offre qu'à la demande, le manque de disponibilité de l'eau par rapport à la demande induit en effet une limitation des volumes importés. La gestion du barrage ayant lieu hors de la zone d'étude et n'étant pas l'objet de la présente étude, elle n'est pas représentée dans le modèle, ce qui explique les mauvais résultats observés quant à ces débits.

Sur la base des données mesurées, il semble qu'aucune corrélation ne puisse être mise en évidence entre les volumes importés depuis le barrage et la technique d'irrigation utilisée (figures 38a et 38b). Cela s'explique aisément puisque le principal moteur de la variation du volume importé depuis le barrage est l'offre d'eau au niveau du barrage alors qu'un éventuel impact de la technique d'irrigation sur ce volume se situerait au niveau de la demande. L'offre étant limitante, une modification de la demande ne modifiera donc en aucun cas les volumes prélevés.



(a) (b)

Figure 38 : Evolution conjointe de la proportion de superficie irriguée au goutte-à-goutte et de l'apport annuel d'eau d'irrigation depuis le barrage (a) et apports annuels d'eau d'irrigation depuis le barrage en fonction de la proportion de superficie irriguée au goutte-à-goutte (b).

Pressions sur la nappe d'eau souterraine

Les interactions sur la nappe d'eau souterraine sont multiples et complexes : infiltration de l'eau de pluie, infiltration de l'eau d'irrigation, drainage latéral entrant et sortant, pompage. La mise en évidence d'un quelconque effet de la technique d'irrigation passe donc impérativement par un traitement préalable visant à éliminer les effets indépendants de l'irrigation. En répartissant uniformément les entrées et sorties d'eau sur l'ensemble de la période de modélisation, l'évolution du niveau de la nappe serait parfaitement linéaire. En ne répartissant uniformément que les apports d'eau par infiltration de la pluie et les écoulements latéraux, la variabilité du niveau de la nappe n'est alors plus influencée que par les aspects liés à l'irrigation, à savoir le drainage d'eau d'irrigation et le pompage (figure 39).

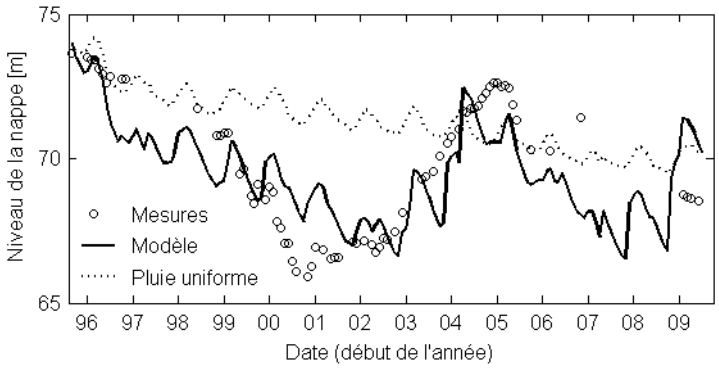
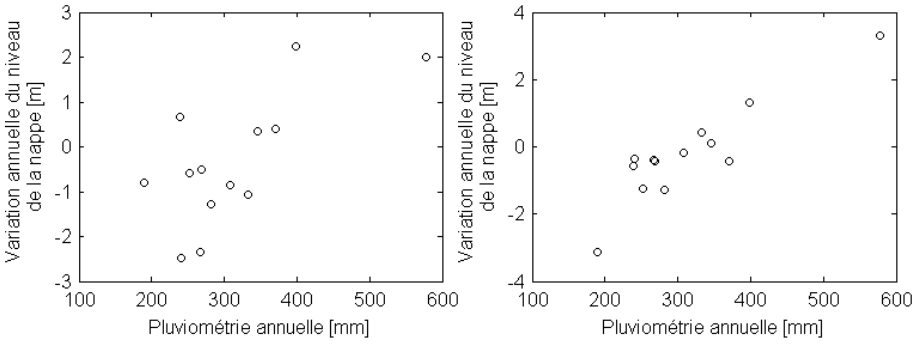


Figure 39 : Evolution des niveaux de la nappe mesurés (cercles), modélisés (trait plein) et évolution théorique du niveau de la nappe si les apports d'eau par infiltration de la pluie et par drainage latéral étaient uniformément répartis sur la période de modélisation (trait pointillé) pour le modèle avec un facteur *p* fixe.

La première observation réalisée sur cette base est que la variabilité du niveau de la nappe serait alors bien moindre. La principale source de variabilité, qui explique la forte diminution observée entre 1995 et 2002, puis la brusque augmentation de 2002 à 2004, etc., est la variabilité des précipitations. Comme le montre la figure 40, une forte corrélation existe en effet entre la pluviométrie annuelle et la variation annuelle du niveau de la nappe, que celle-ci soit mesurée ou modélisée. La suppression de cette source de variabilité réduit donc drastiquement la variabilité du niveau de la nappe.



(a) (b)

Figure 40 : Effet de la pluviométrie annuelle (de septembre à septembre) sur la variation du niveau de la nappe mesurée (a) et modélisée (facteur *p* fixe) (b) pendant la même période.

Pour le modèle faisant intervenir un facteur p fixe, l'observation de la variabilité théorique du niveau de la nappe en l'absence de variation des apports indépendants de l'irrigation permet donc d'isoler l'effet de l'irrigation. La confrontation de cet effet au développement de l'irrigation goutte-à-goutte apporte quelques enseignements intéressants (figure 41). Si, à première vue, la corrélation entre ces deux observations n'est pas flagrante, une analyse plus attentive révèle que le taux de diminution du niveau de la nappe semble s'atténuer en même temps que l'irrigation goutte-à-goutte se répand. La scission de la période de modélisation en trois périodes distinctes rend les choses plus évidentes (tableau 18). Ces trois périodes correspondent à trois phases de développement de la technologie goutte-à-goutte : aucune superficie irriguée en goutte-à-goutte (1995-2001), moins de 5% des superficies irriguées en goutte-à-goutte (2002-2006) et plus de 10% des superficies irriguées en goutte-à-goutte (2007-2009).

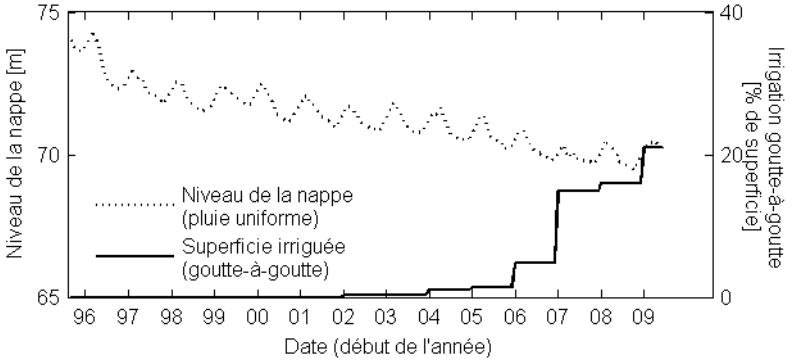


Figure 41 : Evolution théorique du niveau de la nappe si les apports d'eau par infiltration de la pluie et par drainage latéral étaient uniformément répartis sur la période de modélisation (trait pointillé) et évolution de la proportion de superficie irriguée en goutte-à-goutte.

Tableau 18 : Variation moyenne mensuelle du niveau théorique de la nappe avec pluie et drainage latéral uniformes (facteur *p* fixe), irrigation totale moyenne mensuelle, eau d'irrigation drainée moyenne mensuelle et rapport entre l'eau d'irrigation drainée et l'irrigation totale pour trois périodes correspondant à trois phases de développement de la technologie goutte-à-goutte. Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes pour l'ensemble de la zone d'étude. Les valeurs entre parenthèses sont les dates auxquelles correspondent les trois périodes (tous les calculs sont réalisés de janvier à décembre en raison de la saisonnalité très marquée des données modélisées).

Développement du goutte-à-goutte [% de superficie]	Variation du niveau de la nappe [m/mois]	Irrigation [mm/mois]	Eau d'irrigation drainée [mm/mois]	Proportion d'eau d'irrigation drainée [%]
0 % (96-01)	-0.037	79.9	14.5	18.1
<5 % (02-06)	-0.027	76.4	13.8	18.0
>10 % (07-08)	-0.007	79.1	16.7	21.1

La variation moyenne du niveau de la nappe avec pluie et drainage latéral uniformisé montre une nette stabilisation, en passant d'une diminution de 3.7 cm/mois au cours de la première période à une diminution de 2.7 cm/mois au cours de la deuxième puis surtout à une quasi-stabilisation (-7 mm/mois) au cours de la dernière. Cela indique une diminution des pressions anthropiques sur les ressources en eau souterraine durant cette période. Pourtant, entre les deux dernières périodes, l'augmentation de l'irrigation, et donc du pompage qui, pour rappel, est calculé comme une proportion fixe de l'irrigation totale, tendrait à affirmer le contraire. Plus que l'augmentation de l'eau d'irrigation drainée, qui n'est pas surprenante

lorsque l'irrigation augmente, cette diminution des pressions anthropique simultanée à une augmentation du pompage est liée à l'augmentation du rapport entre eau d'irrigation drainée et irrigation totale.

Comme ce fut démontré au début de ce chapitre, la quantité d'eau d'irrigation appliquée, quelle que soit la technique d'irrigation utilisée, est généralement largement suffisante et bien souvent excédentaire dans la zone d'étude. Le sol étant donc la plupart du temps au moins à la capacité au champ, il n'est pas capable de retenir plus d'eau et toute augmentation de l'apport d'eau d'irrigation est donc immédiatement drainée. Le surplus d'irrigation observé avec le développement de la technologie goutte-à-goutte est donc intégralement drainé, ce qui explique l'augmentation de la proportion globale d'eau d'irrigation drainée. Or, si ce surplus est partiellement pompé et que cela pourrait *a priori* avoir un impact négatif sur l'évolution du niveau de la nappe, le solde est importé depuis le barrage. Puisqu'intégralement drainé, la partie de ce surplus provenant de la nappe y retourne directement tandis que l'autre partie, provenant du barrage, constitue une recharge nette. Cela explique le bilan finalement positif de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte sur les pressions anthropiques sur les ressources en eau souterraine.

Lorsque le même exercice est réalisé à partir des résultats du modèle faisant intervenir un facteur *p* variable, la plupart des conclusions sont similaires. Les quantités irriguées étant absolument identiques dans les deux modèles, la proportion d'eau drainée n'est en effet pas modifiée par la prise en compte d'un facteur *p* variable. Elle influence par contre l'évolution du niveau de la nappe et les résultats diffèrent à ce point de vue.

Les variations moyennes du niveau de la nappe sont alors de -6 cm/mois (1996-2001) puis de +5 mm/mois (2002-2006) et enfin de -4 cm/mois (2007-2008). Ici, l'influence de l'irrigation sur le niveau de la nappe n'est donc plus corrélée au type d'irrigation. En effet, le principal facteur influençant le niveau de la nappe est alors le pourcentage d'eau d'irrigation pompée, qui varie sensiblement entre ces périodes. Il est, en moyenne, de 42% durant la première période, de 37% durant la deuxième et de 43% durant la troisième en raison des différences climatiques entre ces périodes (les valeurs médianes du rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration de référence sont respectivement de 0.13, 0.22 et 0.16 pour ces 3 périodes). L'effet de cette variation de la proportion d'eau pompée est alors plus important que celui de la variation de proportion d'eau d'irrigation drainée. Au travers de la variabilité du facteur p, la variabilité climatique reste donc,

dans cette configuration, prépondérante, même sur le niveau théorique de la nappe avec pluie et drainage latéral uniforme.

Discussion

Le modèle

L'approche de modélisation développée dans cette section se base sur les données. La conception initiale de la structure du modèle en elle-même s'est en effet basée sur les données initialement disponibles. Cette structure a ensuite été étoffée de manière ciblée au regard des faiblesses de la structure initiale. Cette approche permet à la fois de maximiser l'information qui peut être déduite des données existantes tout en minimisant le travail de collecte de données supplémentaires.

L'accès à des données de qualité est en effet une contrainte majeure dans nombre de périmètres irrigués à travers le monde et les campagnes de collecte de données sont souvent très couteuses, en temps et en moyens financiers (*e.g.* Bastiaanssen et al. 2007). La prise en compte explicite de cette problématique implique certes certaines concessions mais optimise donc l'utilisation des données existantes tout en minimisant les couts.

La structure du modèle est basée sur le concept de bilan hydrique et les interactions entre réservoirs sont ici représentées de manière assez grossière. L'intégration à cette structure des résultats de l'analyse économique réalisée précédemment permet néanmoins d'intégrer l'effet des facteurs tant naturels (pluviométrie, flux souterrains latéraux...) qu'anthropiques (gestion et pratiques d'irrigation) sur le cycle de l'eau dans la zone d'étude. Les résultats sont de faible qualité quand il s'agit de représenter les apports d'eau du barrage mais cette faible qualité trouve son explication dans l'absence de prise en compte de la gestion de l'eau du barrage, hors frontières du modèle et donc non représentée. La dynamique de la nappe est par contre beaucoup mieux représentée et le modèle trouve là toute son utilité.

Après calibration, une relative incohérence entre le pourcentage d'eau pompée estimée sur le terrain (50%) et calibrée (41.9%) pose question. L'utilisation d'une valeur fixe pour toute la période de simulation mérite donc d'être commentée. Le *droit de l'eau* marocain est extrêmement complexe et fait l'objet de nombreux débats. Globalement, il garantit aux agriculteurs le droit d'utiliser l'eau qui leur est accessible et les possibilités de restriction sont rares. Un accès à l'eau souterraine représente donc une garantie d'approvisionnement et l'immense majorité des agriculteurs de la zone d'étude disposent d'un tel accès (puits ou forage). Les agriculteurs

utilisent cette eau comme une variable d'ajustement en fonction de la disponibilité en eau du barrage, compensant une éventuelle diminution de l'apport d'eau du barrage par un supplément de pompage. Le pourcentage d'eau d'irrigation pompé est donc éminemment variable et très difficile à mesurer, plus encore à modéliser. L'utilisation d'une valeur fixe pour ce paramètre est donc une hypothèse très forte et une des principales approximations du modèle.

Pour cette raison, l'implémentation d'une valeur variable pour ce facteur *p*, basée sur un indice d'aridité défini comme le rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration de référence, fut réalisée. Cette implémentation ne donne toutefois pas de résultats significativement meilleurs. La proportion moyenne d'eau pompée, 40.2%, est d'ailleurs très proche de celle obtenue avec un facteur *p* fixe. L'explication pourrait être que la variabilité des apports d'eau du barrage répond à une logique plus complexe que les seules conditions climatiques immédiates. Outre l'effet tampon du réservoir, qui atténue les effets des variations climatiques, la gestion du barrage, compte tenu de ses nombreux objectifs, entraine une variabilité de la disponibilité en eau d'irrigation qu'il est difficile de représenter sans avoir une connaissance approfondie des outils utilisés pour cette gestion.

Le modèle, sous ces deux configurations, représente assez mal l'évolution fine du niveau de la nappe mais la dynamique à long terme de l'évolution de ce niveau y est représentée de manière satisfaisante. Toutefois, au-delà de l'absence de prise en compte de l'aspect dynamique de l'infiltration, plusieurs pistes d'améliorations peuvent être envisagées.

Géologiquement, l'aquifère des Triffa serait principalement alimenté à partir des monts Bni Snassens et l'infiltration verticale d'eau de pluie y serait moindre (Ambroggi et al. 1952). Différents établissements de bilan de la nappe dans son ensemble arrivent à des conclusions divergentes. Dans un bilan réalisé avant le développement de l'irrigation à grande échelle, Mortier (1958) observe que 62% des apports proviennent de flux verticaux, seuls 38% provenant de flux latéraux. A l'inverse, bien après l'intensification de l'irrigation, El Idrisy et De Smedt (2006) concluent que 24% seulement des apports proviennent de flux verticaux, les 76% restant provenant de flux latéraux. L'aquifère des Triffa est un aquifère complexe, composé de plusieurs aquifères superposés. Des transferts d'eau en provenance des aquifères profonds vers l'aquifère superficiel au travers de failles sont par ailleurs fréquemment évoqués (Mortier 1958; Khattach et al. 2004), ce qui induit une dynamique complexe et rend la modélisation délicate.

Les résultats du modèle ici présenté indiquent que 92% des apports proviennent de flux verticaux, seuls 8% provenant de flux latéraux. Bien que ce bilan soit limité à une partie de la nappe, de tels écarts avec les observations précédentes sont indéfendables. L'influence des monts Bni Snassens n'est, dans ce modèle, représentée qu'à travers la prise en compte des conditions aux limites amont (le niveau piézométrique en amont de la zone d'étude). L'analyse de sensibilité d'une version précédente du modèle montre que les résultats sont d'ailleurs très peu sensibles à ces conditions et la dynamique de la nappe d'eau souterraine y est donc majoritairement influencée par les flux verticaux. La bonne corrélation entre l'intensité des pluies et la variation du niveau piézométrique (figure 40), aussi bien mesurée que modélisée, plaide également en faveur de cette conception.
Une piste d'explication pourrait être une corrélation entre la pluviométrie dans les monts Bni Snassens et la pluviométrie dans la plaine des Triffa. Physiquement, la pluie s'infiltrerait au niveau des monts et l'augmentation du niveau piézométrique sous ces monts induirait une augmentation du flux latéral entrant dans la nappe des Triffa ; la relation observée entre la pluie dans la plaine et la variation du niveau piézométrique serait alors purement statistique.
Pour valider cette analyse et quantifier plus finement les flux latéraux, un réseau piézométrique dense, entretenu et régulièrement suivi est indispensable. Malheureusement, la réalité est tout autre, le nombre de piézomètres régulièrement suivis étant passé de plus de 30 en 1974 à 4 en 2000. La réhabilitation des piézomètres abandonnés et le suivi plus régulier des piézomètres encore fonctionnels sont les premières étapes indispensables à une gestion durable et maitrisée de la nappe des Triffa.

La nappe d'eau souterraine

Dans la configuration où la proportion d'eau pompée est considérée comme fixe, l'analyse des résultats montre que le développement de l'irrigation goutte-à-goutte se traduit par une diminution des pressions sur la nappe d'eau souterraine. D'une part, ce développement s'accompagne d'une augmentation nette de l'irrigation et donc d'une augmentation du pompage. D'autre part, la proportion d'eau d'irrigation drainée augmente elle aussi. La majeure partie de cette eau provenant du barrage, le bilan est alors favorable et participe activement à la recharge de cette nappe. Le déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte se traduit donc par une augmentation des transferts de l'eau du barrage vers la nappe d'eau souterraine et la pression

sur cette nappe est donc réduite lorsque les agriculteurs adoptent la technologie goutte-à-goutte.
Cette analyse repose toutefois uniquement sur les données modélisées. L'incapacité du modèle à représenter correctement les apports d'eau depuis le barrage appelle à une grande prudence dans l'interprétation de ces résultats.
Cette explication implique en effet une augmentation du volume d'eau importé depuis le barrage, qui est observée dans les données modélisées. Pour être validée, une telle augmentation devrait être observée sur la base des données mesurées. Or, il n'en est rien. La raison est une fois encore celle mentionnée plus haut : l'apport d'eau du barrage est essentiellement régi par l'offre et une augmentation de la demande ne se traduit donc pas par une augmentation des apports.
En implémentant une proportion d'eau pompée variable dans le modèle, il reste difficile de dire si cette absence de réponse à une demande croissante d'eau du barrage est compensée par une augmentation du pompage (et donc de la proportion d'eau pompée) et que notre modèle sous-estime alors les pressions sur les ressources en eau souterraine ou si elle n'est pas compensée et que l'irrigation totale modélisée, ici uniquement calculée sur la base de la demande, est alors surestimée. La proportion d'eau pompée est en effet principalement corrélée aux précipitations. La corrélation entre la pluie et la disponibilité en eau du barrage est quant à elle beaucoup moins directe. Les témoignages recueillis sur le terrain tendent toutefois à soutenir la première hypothèse, chaque agriculteur disposant d'une capacité de pompage qu'il utilise en cas de non-approvisionnement en eau du barrage.
Dans le modèle prenant en compte une variabilité de la proportion d'eau pompée, une diminution de la pluviométrie entraine une augmentation de la proportion d'eau pompée. Les résultats quantifiés montrent que cet effet compense largement l'augmentation de la proportion d'eau d'irrigation drainée. La comparaison de ces résultats illustre donc que la diminution des pressions sur la nappe observée dans l'analyse du modèle sous sa première configuration est minime et susceptible d'être facilement compensée par d'autres effets, par exemple liés aux volumes pompés. Il est donc probable qu'elle reste purement théorique et ne soit jamais observée en réalité.

Les apports d'eau du barrage

Enfin, les apports d'eau depuis le barrage sont très mal représentés par le modèle. Une corrélation entre les données modélisées et le déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte est observée, indiquant que la demande en eau du

barrage augmente lors du passage à cette technologie. Cette corrélation n'est par contre nullement présente entre les apports d'eau mesurés et le déploiement de la technologie.
La divergence entre les données mesurées et modélisées s'explique par le mode de gestion du barrage, dont les apports sont avant tout limités par la disponibilité en eau. Cette gestion *de facto* fonction de l'offre mérite discussion. L'objectif officiellement poursuivi par les gestionnaires de l'irrigation en promouvant la technologie goutte-à-goutte est une réduction des prélèvements d'eau pour l'irrigation, en particulier depuis le barrage. Compte tenu de la limitation par l'offre, une éventuelle diminution de la demande – éventuelle car il fut démontré plus tôt dans ce chapitre qu'une telle diminution est loin d'être systématiquement observée – ne se traduirait en aucun cas par une diminution des prélèvements tant que l'offre est limitante.
Cette constatation fait écho aux résultats de plusieurs auteurs, pour qui une offre suffisante et gérée de manière souple est un prérequis indispensable pour rendre effective une réduction de la demande (Pereira et al. 2002; Molden et al. 2007). En Espagne, le déploiement de réseaux de distribution « à la demande » a ainsi été une des mesures clés qui a permis de diminuer de 21% l'utilisation d'eau pour l'agriculture depuis 1950 (Corominas 2010). Un tel déploiement ne va malheureusement pas de soi. En Espagne toujours, il s'est accompagné d'une hausse drastique de la consommation d'énergie (de 6 à 18 fois plus qu'avec un réseau de distribution traditionnel) tandis que, sur la plan économique, le prix de l'eau pour les agriculteurs y aurait été multiplié par quatre (Corominas 2010; Díaz et al. 2012). Enfin, outre des investissements considérables dans les infrastructures de distribution, une disponibilité en eau suffisante est évidemment nécessaire à un tel déploiement (Sarwar et al. 2001).
Ces multiples freins rendent, à court terme, inenvisageable une telle mesure au sein de la plaine des Triffa. La gestion de la demande n'y est pas, pour autant, vaine. Les agriculteurs utilisant l'eau de la nappe souterraine comme variable d'ajustement en cas d'apports jugés insuffisants depuis le barrage et cette eau pouvant être considérée comme disponible « à la demande », une éventuelle réduction de la demande pourrait avoir un effet sensible sur les prélèvements d'eau dans leur ensemble.

Conclusion

Diminuer les pressions sur les ressources en eau est le principal objectif affirmé de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte. Deux points de vue

antagonistes existent toutefois et il apparait que, si l'*efficience de l'irrigation* peut potentiellement être améliorée en utilisant la technologie goutte-à-goutte, une amélioration de cette efficience ne se traduirait pas automatiquement par une diminution des pressions sur les ressources en eau.
La modélisation du cycle de l'eau à l'échelle du périmètre irrigué permet d'apporter des éléments de réponse à cette question pour le cas de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte dans le CMV 103 de la plaine des Triffa. Le modèle développé repose sur le concept de bilan hydrique et est spécifiquement conçu sur la base des données disponibles. Le processus de construction de ce modèle permet d'optimiser la quantité d'informations qui peuvent être tirées de ces données tout en gardant une structure simple, ce qui facilite l'assimilation des résultats par les principaux acteurs, et en réduisant les coûts associés au processus de modélisation et de collecte de données.
Le modèle s'avère fiable en ce qui concerne le niveau de la nappe d'eau souterraine même si certains doutes peuvent être émis quant aux fondements physiques des processus qui permettent de représenter l'évolution de ce niveau. Il s'avère par contre incapable de représenter la dynamique d'évolution des apports d'eau d'irrigation depuis le barrage, qui est principalement déterminée par l'offre d'eau au niveau du barrage. La demande en eau du barrage est, elle, intéressante à analyser.
Les résultats montrent que la quantité d'eau d'irrigation totale appliquée n'est pas modifiée par la conversion au goutte-à-goutte. Ainsi, entre 1996 et 2001, aucune superficie n'est irriguée au goutte-à-goutte et l'irrigation moyenne est de 79.9 mm/mois. En 2007 et 2008 par contre, plus de 10% des superficies sont irriguées au goutte-à-goutte et l'irrigation moyenne est de 79.1 mm/mois. La pluviométrie moyenne pour ces deux périodes est toutefois très différente, de 23 mm/mois pour la première et de 35 mm/mois pour la seconde (mais ces précipitations sont évidemment très inégalement réparties). Cette absence de diminution des volumes irrigués contredit les défenseurs d'une vision purement technique. Toutefois, les arguments avancés par les économistes pour expliquer cette augmentation ne s'appliquent pas non plus, la *substitution* étant impossible et l'*effet de revenu* potentiel étant trop faible pour être significatif.
L'effet de cette augmentation sur les pressions sur la nappe d'eau souterraine est par contre moins clair. Ces pressions diminuent quand les superficies irriguées par la technologie goutte-à-goutte augmentent. L'irrigation seule provoque ainsi une diminution moyenne du niveau de la nappe de 2.7 cm/mois lorsque moins de 5% des superficies sont irriguées au goutte-à-

goutte alors que cette diminution est limitée à 0.7 cm/mois lorsque plus de 10% des superficies le sont. L'augmentation des volumes appliqués implique en effet un transfert accru de l'eau du barrage vers cette nappe, qui peut compenser l'augmentation du pompage qui découle de l'augmentation de l'irrigation totale si la proportion d'eau d'irrigation pompée reste constante. Ce processus est par contre assez sensible à une variation de cette proportion. Si cette proportion augmente, par exemple suite à des conditions climatiques moins favorables comme il y en eut en 2007 et 2008, cette diminution des pressions sur la nappe est alors complètement neutralisée, voire dépassée.

La demande en eau du barrage augmente quant à elle lorsque l'irrigation goutte-à-goutte se développe mais l'augmentation de cette demande ne se reflète pas dans les apports d'eau mesurés car ces apports sont essentiellement régis par l'offre.

En conclusion des premières sections de ce chapitre, il est apparu qu'une augmentation de l'efficience réelle de l'irrigation ne peut être obtenue que par une prise en compte explicite de l'usage qui est fait des systèmes d'irrigation dans les politiques de développement de l'irrigation. Dans le cas précis de la zone étudiée, une augmentation de cette efficience ne se traduirait de toute façon pas par une diminution des pressions sur le barrage, l'offre étant pour l'instant largement inférieure à la demande. Par une combinaison d'effets complexes, le développement de la technologie goutte-à-goutte pourrait cependant dans certains cas se traduire par une légère diminution des pressions sur les ressources en eau souterraine.

Les données collectées et les modèles développés permettent donc de tirer une série de conclusions originales en quantifiant l'effet du développement de la technologie goutte-à-goutte sur les ressources en eau régionales. L'incertitude associée aux résultats obtenus reste toutefois importante. Une amélioration de la structure du modèle représentant le cycle de l'eau pour l'ensemble de la zone d'étude, qui ne permet actuellement pas de représenter correctement la dynamique de la nappe et celle du débit dans le canal d'amenée d'eau d'irrigation en même temps, permettrait de réduire cette incertitude. Une telle amélioration n'est toutefois possible que moyennant l'obtention de données plus complètes, lesquelles n'existent actuellement pas. Ces données seraient en priorité un suivi des quantités d'eau pompées dans la nappe par les agriculteurs, un suivi plus fin de l'évolution du niveau de la nappe d'eau souterraine et une meilleure caractérisation du fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude.

Chapitre 4 - Notions de performance

Le troisième chapitre de ce document a permis de faire le point sur la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte du point de vue de l'efficience. Il en ressort que cette transition, contrairement aux objectifs poursuivis par les promoteurs de cette transition, ne s'accompagne pas d'une réduction d'utilisation d'eau d'irrigation.

Ce quatrième chapitre s'intéresse aux performances globales de l'irrigation. La notion de *performance* est une notion plus englobante que l'efficience, pouvant intégrer, en plus des aspects liés à l'eau, des aspects agronomiques, environnementaux, financiers, économiques, sociaux, politiques voire stratégiques (Bos et al. 2005). La définition du processus d'évaluation des performances donnée au début de ce document fait d'ailleurs référence à un objectif d'amélioration permanente, sans autre précision, ce qui illustre bien l'ampleur du champ d'application de la notion de *performance*.

Déplacer le travail du niveau de l'*efficience* au niveau de la *performance* est la suite logique de notre approche. Un des principaux objectifs annoncés de la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte est l'économie d'eau, soit l'amélioration de l'*efficience*. Force est de constater que cet objectif n'est pas rempli. Or, de plus en plus d'agriculteurs se convertissent effectivement à l'irrigation goutte-à-goutte. Si, pour eux, les objectifs de cette conversion ne résident pas dans une amélioration de l'*efficience*, ils ne peuvent qu'être une amélioration de *performance*. La mise en place d'un processus d'évaluation des performances, pour l'irrigation gravitaire et pour l'irrigation goutte-à-goutte, et l'analyse comparative détaillée de leurs *performances* respectives devraient permettre d'identifier les objectifs effectifs des agriculteurs qui se convertissent à l'irrigation goutte-à-goutte et ainsi de répondre aux troisième et quatrième objectifs spécifiques de cette étude.

La mise en place d'un tel processus d'évaluation des performances implique de suivre une démarche rigoureuse, telle que décrite par (Bos et al. 2005). Pour rappel, le cadre proposé consiste en l'application successive de 5 étapes : la définition des objectifs et stratégie de l'évaluation, l'étape de *conception et planification* du processus, sa *réalisation*, l'*application des résultats* de cette évaluation et, enfin, une *évaluation finale*.

4.1 - Objectifs et stratégie d'évaluation des performances

L'objectif de la mise en place du processus d'évaluation des performances de l'irrigation est donc ici d'identifier les objectifs effectivement poursuivis par l'agriculteur lors de la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte. Pour ce faire, le processus d'évaluation devra mettre en lumière, dans le détail, les aspects de la *performance* qui sont modifiés suite au processus de conversion du point de vue de l'agriculteur.

Notre approche se veut exploratoire et inductive puisqu'aucune hypothèse n'est formulée *a priori* sur les objectifs effectifs de cette conversion. Le principe d'une telle approche est de « partir des observations de terrain pour élaborer des hypothèses explicatives et une théorie ad hoc du phénomène » (Brisepierre 2011). Elle permet une ouverture totale aux observations réalisées sur le terrain et facilite l'intégration de spécificités locales mais ne peut prétendre expliquer de façon définitive les processus abordés. Cette approche est donc particulièrement adaptée à l'objectif de cette évaluation des performances de l'irrigation dans la mesure où il s'agit d'identifier des objectifs effectifs qui n'ont justement jamais été explicitement formulés.

La perspective adoptée pour cette évaluation est la perspective de l'agriculteur. L'objectif étant d'identifier les raisons qui poussent l'agriculteur à adopter l'irrigation goutte-à-goutte, l'hypothèse selon laquelle ces raisons sont avant tout d'ordre personnel et que l'impact collectif de la conversion est une préoccupation négligeable semble en effet raisonnable. Plusieurs études ont en effet montré que les principaux déterminants de l'adoption d'une nouvelle technologie sont d'ordre personnel. Ainsi, Brisepierre (2011) montre que, en France, la consommation d'énergie des ménages répond plus à des contraintes pratiques qu'à une quelconque motivation individuelle comme, par exemple, la sensibilité écologique. Plus directement, les raisons évoquées par des agriculteurs de divers périmètres irrigués à travers le monde pour expliquer leur passage à l'irrigation goutte-à-goutte peuvent varier mais sont toutes liées à des considérations pratiques propres à leur exploitation (van der Kooij 2009; Benouniche et al. 2011; Tuabu 2012; van der Kooij et al. 2013). En vue de répondre efficacement aux objectifs de cette évaluation, il convient donc de se focaliser sur les performances du point de vue de l'agriculteur et de laisser de côté les performances du système à plus large échelle.

L'évaluation est ici réalisée par nos soins et est une évaluation interne puisqu'elle vise à comparer deux états d'un même système. La stratégie développée entend intégrer les limites de l'approche classique de l'*évaluation des performances de l'irrigation* identifiées précédemment. Pour rappel, ces limites sont liées, d'une part, à l'implication des différents acteurs dans le processus d'évaluation et à l'impact de cette implication sur les phases d'*application des résultats* et d'*évaluation finale* et, d'autre part, à la qualité et l'accès aux données nécessaires pour la phase de *réalisation*.

Le principal avantage d'une approche centralisée *top-down* est la garantie que les objectifs sont correctement définis et que les solutions proposées permettent effectivement de remplir les objectifs. Son principal inconvénient est que les solutions proposées peuvent ne pas être adaptées aux réalités de terrain et donc s'avérer inefficaces ou encore que le manque d'implication des acteurs dans le processus de décision ne mène à un échec des solutions implémentées, les acteurs responsables de l'implémentation des solutions ne s'exécutant que parce que ces solutions leur furent imposées et en aucun cas pour remplir l'objectif poursuivi (Reed et al. 2006). A l'inverse, une approche participative *bottom-up* bien menée assure généralement l'adhésion des acteurs de premier plan aux objectifs poursuivis et maximise les chances de succès des solutions implémentées (Huntington et al. 2002). Elle échoue par contre parfois à identifier clairement les objectifs, les acteurs de premier plan pouvant manquer de recul et de vision à long terme. Elle est par ailleurs très lourde et laborieuse à implémenter, ce qui est un obstacle supplémentaire à sa mise en œuvre (Fraser et al. 2006). La mise en place d'une procédure hybride, équilibrée entre ces deux approches, est donc souhaitable (Reed et al. 2006).

Le processus d'évaluation des performances de l'irrigation ici développé étant intrinsèquement centralisé, la définition des objectifs et du cadre de travail ne devraient donc pas poser de problème. Le manque d'implication des acteurs de l'irrigation pourrait par contre provoquer certaines difficultés, et ce à deux niveaux.

1. Afin d'évaluer les performances de l'irrigation du point de vue des agriculteurs, il faut s'assurer que les indicateurs de performance utilisés reflètent effectivement le point de vue des agriculteurs. Cette lapalissade implique idéalement que le choix des indicateurs soit réalisé en étroite collaboration avec les agriculteurs concernés. La mise en place d'un tel processus participatif n'est malheureusement pas envisageable dans le cadre de ce travail, principalement à cause de sa lourdeur et des contraintes matérielles inhérentes à la

réalisation de cette thèse. Les indicateurs sélectionnés grâce à une approche participative lors d'un travail d'évaluation de l'agriculture réalisé précédemment dans un autre contexte seront récupérés et adaptés au contexte de cette étude. Si cette adaptation se fait de manière centralisée, la conception participative originelle de ce cadre devrait garantir une certaine validité aux indicateurs qui en sont issus.

2. Le processus d'évaluation, outre son intérêt académique, a pour objectif d'apporter des éléments de réflexion aux décideurs et gestionnaires du périmètre irrigué analysé. Leur implication dans le processus de réflexion devrait donc faciliter l'appropriation et l'utilisation des conclusions de ce travail. Malheureusement, si ce travail n'a pu être réalisé que grâce à des contacts réguliers avec ces acteurs, leur implication dans l'élaboration de ce processus se limite à quelques discussions informelles et disparates qui risquent d'être insuffisantes pour garantir leur adhésion totale à la méthodologie ici développée.

Le problème de l'accès et de la qualité des données, souligné par de nombreux auteurs (Sam-Amoah and Gowing 2001; Bastiaanssen et al. 2007; Hamid et al. 2011; Kharrou et al. 2013), est parfaitement d'actualité dans le contexte ici étudié. Nombre de données sont inexistantes. Quant aux données qui existent, hormis quelques données peu sensibles, comme par exemple les données météorologiques, que les administrations locales diffusent facilement, leur acquisition est particulièrement délicate. Le dernier chapitre de ce travail fait d'ailleurs explicitement le point sur cette question.
Actant cette réalité, l'approche d'évaluation se veut centrée sur les données. Dans le cas contraire, la définition d'une liste d'indicateurs idéale mènerait inévitablement à une liste de données impossibles à rassembler. Le risque de devoir utiliser des données très peu fiables serait alors important et la crédibilité du travail en serait ébranlée. Une définition des indicateurs qui tient explicitement compte de l'accès aux données et de leur fiabilité implique certes de renoncer à certains indicateurs *a priori* pertinents mais permet également de garantir une fiabilité minimale à tous les indicateurs quantifiés. Cette dernière option est donc retenue et la problématique des données sera donc intégrée à la sélection finale des indicateurs de performance.

L'analyse comparative entre les *performances* observées pour les deux types d'irrigation visant à évaluer les aspects de la *performance* qui sont modifiés suite au processus de conversion, cette analyse est réalisée directement sur les indicateurs en comparant leurs valeurs selon le type d'irrigation pratiqué. La valeur de ces indicateurs ne doit donc pas être évaluée dans l'absolu, leur valeur pour les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire servant de valeur de référence. Par ailleurs, aucune étape d'agrégation des indicateurs n'est nécessaire. De nombreuses difficultés relatives à l'une ou l'autre de ces étapes sont ainsi évitées (Van Cauwenbergh 2008).

Une grosse partie des données utilisées pour quantifier les indicateurs provient d'entretiens réalisés auprès des agriculteurs au cours des saisons 2012 et 2013. L'étude comparative des *performances* de l'irrigation pour les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire et l'irrigation goutte-à-goutte ne peut donc se faire *via* un suivi temporel de l'évolution de ces *performances*. L'hypothèse selon laquelle les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire en 2012-2013 sont représentatives des exploitations avant la conversion au goutte-à-goutte et que les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte en 2012-2013 sont représentatives des exploitations après cette conversion est donc posée. Cette hypothèse est forte mais elle est néanmoins ici acceptable. Le processus de transition ayant été initié en 2000, certaines exploitations se trouvent déjà à un stade avancé du processus de conversion, pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte depuis plus de 10 ans, tandis que d'autres exploitations sont à un stade beaucoup plus précoce de ce processus de conversion. L'ensemble des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte en 2012-2013 présente donc une variabilité importante et, de ce fait, peut être considéré comme représentatif de la diversité observée à un stade avancé du processus de conversion à l'irrigation goutte-à-goutte.

En résumé et pour reprendre point par point la structure proposée par Bos et al. (2005), cette évaluation des performances de l'irrigation s'insère dans l'étude de la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte et vise, *in fine*, à évaluer la pertinence du développement d'un outil particulier, la technologie goutte-à-goutte, pour atteindre un objectif clair, l'économie d'eau. L'objectif général est d'identifier les raisons qui poussent réellement les agriculteurs à se convertir à l'irrigation goutte-à-goutte. Pour ce faire, l'objectif spécifique est d'identifier et de quantifier en quoi (quels aspects en particulier) et dans quelle ampleur cette conversion affecte les *performances* de l'irrigation.

Le public visé par cette évaluation est l'ensemble des décideurs qui, par leur position, peuvent influencer le déploiement de cette technologie. Le point de

vue adopté est celui des agriculteurs puisque l'agriculteur est en définitive le seul réel décideur de la technologie d'irrigation effectivement employée et que l'objectif de cette *évaluation des performances* est d'identifier les objectifs réellement poursuivis par ces agriculteurs. Le processus d'évaluation est réalisé de manière centralisée dans le cadre de la présente étude. L'évaluation portant spécifiquement sur le CMV 103 du périmètre irrigué de la plaine des Triffa, l'objectif étant de comparer deux états de ce même système, cette évaluation ne vise pas à comparer différents périmètres irrigués et peut être qualifiée d'interne. Elle est réalisée sur base de données portant principalement sur les années 2011 à 2013 bien que certaines séries chronologiques plus longues puissent être utilisées pour certaines applications particulières.

4.2 - Conception du processus d'évaluation des performances de l'irrigation

L'objectif de cette deuxième étape de l'implémentation du processus d'évaluation des performances de l'irrigation est de définir les critères et les indicateurs de performance qui seront utilisés (Bos et al. 2005). Les données nécessaires à leur quantification, la manière dont ces données seront collectées et la forme désirée des résultats seront par ailleurs intégrés dans la réflexion.

La sélection des critères et indicateurs de performance se doit de répondre aux objectifs du processus d'évaluation. Cet objectif étant d'identifier les aspects de la *performance* qui sont modifiés suite au processus de conversion du point de vue de l'agriculteur, sans *a priori* sur la nature de ces aspects, les critères et indicateurs sélectionnés doivent permettre une évaluation holistique de la *performance*, envisageant ce concept dans son sens le plus exhaustif possible. Par ailleurs, comme cela est expliqué dans la section précédente, l'adaptation au contexte ici traité d'un ensemble de critères et indicateurs de performance précédemment identifiés suite à la mise en place d'une démarche participative intégrant des agriculteurs est souhaitable.

La cadre SAFE répond à ces deux exigences. Il s'agit d'un cadre d'évaluation de la durabilité de l'agriculture belge développé en 2005 en collaboration avec un ensemble d'acteurs impliqués dans le monde agricole belge (Peeters et al. 2005). Visant à évaluer la durabilité de l'agriculture, ce cadre d'évaluation envisage explicitement les trois piliers que sont les aspects environnementaux, les aspects économiques et les aspects sociaux. A ce titre, il peut donc être considéré comme holistique et être utilisé pour évaluer les performances de l'agriculture au sens large. La démarche participative mise en place lors de l'élaboration de ce cadre lui confère une certaine légitimité et une certaine représentativité des préoccupations du monde agricole. Sans faire l'hypothèse que le monde agricole belge et le monde agricole marocain sont identiques, un certain nombre de similarités devraient toutefois donner une forme de légitimité aux critères et indicateurs qui y sont retenus. Un certain nombre de modifications devront bien entendu y être apportées afin de l'adapter au contexte de la plaine des Triffa et à l'attention qui est portée à la technique d'irrigation.

Méthodologie

La liste définitive de critères à évaluer pour évaluer les performances de l'irrigation et la liste d'indicateurs permettant l'évaluation de ces critères a donc été établie à partir du cadre SAFE. Ce cadre d'évaluation est un cadre hiérarchique qui représente un système en commençant par définir ses différentes fonctions : les *principes*. Pour chaque *principe*, un certain nombre de *critères* sont définis ; ces critères permettent de déterminer si la fonction décrite par le *principe* est durablement remplie par le système. Afin d'évaluer ces *critères*, un certain nombre d'*indicateurs* sont identifiés. La comparaison de ces indicateurs à des valeurs de référence permet, *in fine*, d'évaluer chaque critère (Van Cauwenbergh et al. 2007). Les principes et critères ont vocation à être universels ; seuls les indicateurs et leur valeur de référence doivent, en théorie, être adaptés à notre cas d'étude (Peeters et al. 2005). Dans sa version finale, le cadre SAFE recense 19 *principes* qui peuvent être attribués à un système. A ces 19 principes sont associés 49 *critères*. Pour évaluer ces *critères*, 96 *indicateurs* sont sélectionnés.

L'adaptation du cadre SAFE à notre processus d'évaluation des performances de l'irrigation vise à définir les indicateurs qui seront utilisés pour évaluer les modifications de performance de l'irrigation du point de vue de l'agriculteur dans le contexte de la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte. Un certain nombre d'étapes seront dès lors appliquées afin d'adapter le cadre SAFE à ce contexte.

Pour chaque niveau hiérarchique (*principes*, *critères* et *indicateurs*), une sélection sera effectuée. Si les *principes* et *critères* ont une vocation universelle, tous ne sont cependant pas pertinents pour notre démarche. Il convient donc d'appliquer les étapes de sélection en amont, dès le premier niveau hiérarchique. La sélection appliquée repose sur les questions suivantes, qui découlent d'une traduction systématique de l'objectif de ce processus d'évaluation :

- Le *principe/critère/indicateur* est-il impacté par un changement de technique d'irrigation ?
- Le *principe/critère/indicateur* est-il approprié au contexte du CMV 103 de la plaine des Triffa ?
- Le *principe/critère/indicateur* est-il approprié du point de vue de l'agriculteur ?
- Le *principe/critère/indicateur* rentre-t-il dans le cadre des limites fixées pour ce travail ? Plus particulièrement, n'est-il pas spécifiquement lié à des aspects de qualité, explicitement écartés de cette réflexion ?

- Le *principe/critère/indicateur* est-il raisonnablement quantifiable sur base des données existantes ?

Si la réponse à chacune de ces questions est positive, le *principe/critère/indicateur* est validé et conservé tel quel pour la suite du processus. Dans le cas contraire, le *principe/critère/indicateur* est écarté. L'application systématique de cet algorithme devrait permettre de ne conserver que les *indicateurs* pertinents pour l'objectif fixé et de s'assurer que le calcul de ces indicateurs soit cohérent avec la disponibilité des données.
Enfin, une dernière vérification est effectuée de manière à s'assurer que tous les *critères* sont effectivement évalués par au moins un *indicateur*. Dans le cas contraire, de nouveaux indicateurs permettant cette évaluation sont ajoutés à la liste pour former la liste définitive d'*indicateurs* qui sera utilisée pour l'évaluation des performances de l'irrigation.

Impact du changement de technique d'irrigation

Afin de déterminer, de manière rigoureuse, si le *principe/critère/indicateur* est impacté par un changement de technique d'irrigation, une liste exhaustive des impacts potentiels de ce changement de technique est nécessaire. Pour établir cette liste, un ouvrage de référence traitant de l'irrigation dans tous ses aspects est utilisé comme base de travail.
Cet ouvrage, le *Traité d'irrigation* de Tiercelin (2006), a été parcouru de bout en bout et chaque mention spécifique de la technique du goutte-à-goutte ou de l'irrigation gravitaire fut relevée. Les *spécificités* attribuées à l'une ou l'autre technique furent consignées et la liste de *spécificités* ainsi obtenue est supposée exhaustive. Notons que le terme *spécificité* est volontairement flou et généraliste. L'objectif étant ici de lister « tout ce qui est susceptible de changer » lors du passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte, la liste intègre en effet des aspects très variés, pouvant être d'ordre technique, agronomique, économique, social, de gestion…
Cette liste de *spécificités* fut ensuite analysée et les éléments redondants furent rassemblés. La liste définitive ainsi obtenue a donc la prétention d'être exhaustive. Elle recense 22 *spécificités* qui sont donc susceptibles de changer lors du passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte (tableau 19). A chaque étape de sélection d'un *principe/critère/indicateur*, celui-ci est donc comparé à cette liste. S'il s'avère qu'aucune des *spécificités* listées n'est susceptible d'avoir le moindre impact sur ce *principe/critère/indicateur*, celui-ci est alors écarté.

Tableau 19 : Liste des *spécificités* de l'irrigation gravitaire ou goutte-à-goutte. Les *spécificités* sont définies comme « tout ce qui est susceptible de changer » lors du passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte. Cette liste fut élaborée à partir d'un relevé exhaustif des mentions de l'irrigation gravitaire ou goutte-à-goutte dans le *Traité d'irrigation* (Tiercelin 2006).

	Spécificités		***Spécificités***
1	Application (efficience et hétérogénéité)	12	Contrôle et suivi / précision / gestion (timing et quantités)
2	Technicité	13	Fertilisation
3	Récupération d'eau en aval	14	Manipulation / automatisation
4	Drainage	15	Changement de cultures
5	Sensibilité à la topographie	16	Système racinaire / sensibilité à la sécheresse
6	Sensibilité à la qualité de l'eau / filtration	17	Superficies
7	Pression et débits de l'eau d'irrigation	18	Aspects phytosanitaires
8	Sensibilité à la physique du sol et à la compaction	19	Contrôle des adventices
9	Encombrement de la surface du sol	20	Frais d'investissement et de gestion
10	Main d'œuvre	21	Maintenance et entretien
11	Adaptation aux cultures	22	Energie

Adaptation au contexte de la zone étudiée

A différents niveaux, l'évaluation des performances de l'irrigation est susceptible d'être spécifique au contexte et les *principes/critères/indicateurs* doivent donc être adaptés à ce contexte (Rao 1993). Une compréhension conceptuelle préalable des enjeux spécifiques à la zone étudiée est indispensable à l'identification des indicateurs de performance les plus pertinents. Ce critère est donc appliqué aux *principes/critères/indicateurs* sur base de notre connaissance, compréhension et analyse personnelle du fonctionnement de la zone étudiée. La plupart des décisions trouvent néanmoins leur justification dans le chapitre de ce travail dédié à la description de la zone d'étude.

Perspective de l'agriculteur

L'objectif du processus d'évaluation des performances de l'irrigation étant de quantifier cette *performance* du point de vue de l'agriculteur, il convient de s'assurer que les *principes/critères/indicateurs* reflètent effectivement ce point de vue. Dans sa version finale, le rapport présentant le cadre SAFE (Peeters et al. 2005) spécifie, pour chaque indicateur, l'échelle à laquelle cet indicateur doit être mesuré.

L'hypothèse étant faite que l'objectif de la conversion, pour l'agriculteur, se situe essentiellement au niveau de son exploitation, seuls les indicateurs dont l'échelle de mesure est l'exploitation agricole seront considérés comme pertinents. Plus précisément, les mentions *parcel*, *farm*, *crop* et *cropping plan (all fields)* sont conservées tandis que les mentions *ecosystem*, *landscape*, *region*, *transect*, *watershed* et *catchment* sont écartées. La sélection sur base de la troisième question, « Le *principe/critère/indicateur* est-il approprié du point de vue de l'agriculteur ? », se fait donc uniquement au niveau des *indicateurs*. Un *critère* pour lequel aucun *indicateur* ne représente la *perspective de l'agriculteur* ne sera donc éliminé qu'à ce stade, l'hypothèse étant faite que, si aucun *indicateur* ne reflète le point de vue de l'agriculteur, il est vraisemblable que le *critère* lui-même ne représente pas le point de vue de l'agriculteur.

Restriction au cadre fixé pour ce travail

Comme précisé dans la méthodologie générale, cette étude se limite arbitrairement aux aspects quantitatifs. Les *principes/critères/indicateurs* faisant explicitement référence à la notion de *qualité* seront donc systématiquement écartés, en tout lorsque ceux-ci ne concernent que la notion de *qualité* ou en partie lorsqu'ils font à la fois référence à des notions de *qualité* et à d'autres notions. La présence du mot *qualité* ou d'un autre mot ayant la même racine sera donc ici le critère utilisé pour la sélection ou le rejet des *principes/critères/indicateurs*.

Prise en compte des données disponibles

Enfin, le dernier critère de sélection des *principes/critères/indicateurs* est la possibilité de les quantifier sur base des données disponibles. Ce critère est parfaitement cohérent lorsqu'il est appliqué aux *indicateurs* puisqu'un des critères les plus fréquemment évoqués pour évaluer la pertinence d'un indicateur est qu'il puisse être quantifié (Bell and Morse 2003; Reed et al. 2005). La validité de tout indicateur réside donc, *in fine*, dans son adéquation aux données disponibles (Fekete and Stakhiv 2014). Cette étape de sélection ne sera donc appliquée qu'au niveau des indicateurs.
L'évaluation de l'adéquation de l'*indicateur* aux données disponibles est ici une évaluation personnelle qui tient compte aussi bien des données déjà en notre possession que des données qui peuvent raisonnablement être collectées. Les raisons de l'écartement d'un *indicateur* étant ici souvent contextuelles, cet écartement sera donc justifié au cas par cas.

Notons, pour terminer, que, dans la mesure du possible, un *indicateur* impossible à quantifier pour cause de données non disponibles ou de piètre qualité sera adapté plutôt que purement et simplement écarté. Il sera donc modifié le plus légèrement possible pour le rendre quantifiable sur base des données disponibles sans en changer significativement le sens. L'écartement n'intervient donc que quand il est absolument nécessaire.

Ajout de nouveaux indicateurs

Les étapes de sélection relatives aux *impacts du changement de technique d'irrigation*, à l'*adaptation au contexte étudié* et à la *restriction au cadre fixé pour le travail* s'appliquent à l'ensemble des niveaux hiérarchiques du cadre SAFE. La prise en compte de la notion de *perspective de l'agriculteur* et de la *prise en compte de données disponibles* ne s'applique par contre qu'aux *indicateurs*.

Au terme de ce processus de sélection, il est probable qu'un certain nombre de *critères* ne soient évalués par aucun des *indicateurs* sélectionnés. L'ajout éventuel de nouveaux *indicateurs* permettant l'évaluation de ces *critères* permettra de clôturer définitivement ce processus de sélection des indicateurs.

Cette sélection se fait sur base bibliographique. Les indicateurs mentionnés par 17 documents sélectionnés pour la présence d'indicateurs de performance de l'irrigation en leur sein sont recensés (tableau 20). Les redondances sont supprimées et la liste d'indicateurs ainsi obtenue est confrontée aux *critères* non évalués : les indicateurs permettant potentiellement d'évaluer ces *critères* sont retenus. Le processus de sélection des indicateurs qui vient d'être décrit est alors une nouvelle fois appliqué à ces indicateurs et, au terme de ce processus, les indicateurs appropriés sont ajoutés à la liste des *indicateurs* issus du cadre SAFE, formant ainsi la liste définitive des *indicateurs* qui seront utilisés dans ce travail pour évaluer les performances de l'irrigation du point de vue de l'agriculteur dans le contexte de la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans le CMV 103 de la plaine des Triffa.

Tableau 20 : Liste des documents consultés pour établir une liste d'indicateurs des performances de l'irrigation utilisée pour sélectionner des indicateurs à même d'évaluer les *critères* non-évalués suite à l'application du processus de sélection.

Bos and Nugteren (1990)	Zahm et al. (2005)
Rao (1993)	Svendsen et al. (2008)
Molden et al. (1998)	Van Cauwenbergh (2008)
Lofgren et al. (1999)	Muller (2009)
Dembélé et al. (2001)	UN-TFIMR (2009)
Kristensen (2003)	UN-WWAP (2009)
MEEDDM (2004)	Greyling (2010)
Margat (2005)	Fekete and Stakhiv (2014)
Skaggs and Samani (2005)	

Résultats

Les principes

Le cadre SAFE identifie 19 *principes*, ou fonctions principales d'un système. Parmi ces 19 *principes*, 13 sont relatifs au pilier environnemental, 1 est relatif au pilier économique et 5 sont relatifs au pilier social (tableau 21). Bien que ces principes aient en théorie une vocation universelle (Peeters et al. 2005), il convient de les passer en revue par rapport aux critères de sélection décrits précédemment.

L'application de l'algorithme de sélection permet d'écarter 4 principes, tous relatifs au pilier environnemental (tableau 21). Ils sont tous les quatre écartés en raison des limites fixées au cadre du travail selon lesquelles les questions de *qualité* sont arbitrairement écartées. La vocation universelle de ces *principes* n'est donc pas ici remise en cause. 15 *principes* doivent donc être évalués.

Tableau 21 : Piliers et *principes* identifiés dans le cadre SAFE. Les *principes* barrés ne seront pas pris en compte dans l'évaluation des performances de l'irrigation pour les raisons évoquées dans la colonne *Justifications*.

Piliers	*Principe*s (fonctions de l'écosystème)	Justifications*
Environnemental	Régulation de la stabilité de l'écosystème	
	~~Offre d'air de qualité~~	*qualité*
	Effet tampon sur l'air	
	Stock de sol	
	~~Stock de sol de qualité~~	*qualité*
	Offre d'eau	
	~~Offre d'eau de qualité~~	*qualité*
	Effet tampon sur l'eau	
	Offre d'énergie	
	Effet tampon sur les flux d'énergie	
	Stock de ressource biologique	
	Stock d'habitat	
	~~Stock d'habitat de qualité~~	*qualité*
Economique	Fonction économique	
Social	Production de l'agro-écosystème	
	Bien-être physique de la communauté agricole	
	Bien-être psychologique de la communauté agricole	
	Bien-être de la société	
	Information	

**qualité* : restriction au cadre fixé pour ce travail (les questions de qualité sont écartées)

Les critères

Aux 15 *principes* à évaluer, le cadre SAFE associe 42 *critères*. Tout comme les *principes*, ces *critères* ont une vocation universelle. L'application de l'algorithme de sélection permet toutefois d'en écarter 8 (tableau 22).

Parmi ces 8 *critères* écartés, 2 d'entre eux sont écartés car ils ne sont pas pertinents pour la zone d'étude. Il s'agit de la minimisation des pertes en terre et de la régulation du ruissellement et des inondations. Ces deux critères faisant référence au ruissellement et aux inondations, ils sont fortement influencés par la topographie. La pente, en particulier, intervient systématiquement dans les calculs de pertes en terre par érosion, comme en témoigne par exemple la présence du facteur *LS* dans l'équation *USLE* de (Wischmeier and Smith 1978). De même, la pente influence fortement la fraction d'eau de pluie qui sera transférée sous forme de ruissellement (Musy and Higy 2009). Dans la zone étudiée, les pentes sont extrêmement faibles.

La pente moyenne observée sur base du MNT Aster y est inférieure à 2.5% et plus de 93% des superficies ont une pente inférieure à 5%. La pente est donc faible dans notre zone d'étude et les problèmes de pertes en terre et de ruissellement qui sont associés à de fortes pentes peuvent donc être y considérés comme négligeables, ce qui justifie l'écartement de ces deux critères.
Les 6 autres critères écartés le sont soit parce qu'ils intègrent la notion de *qualité* (3 critères) et ne rentrent donc pas dans les limites arbitrairement fixées à ce travail, soit parce que la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte serait sans impact sur ces critères (3 critères). Ces trois derniers critères font partie du pilier social ; ils concernent la situation familiale, l'accès aux infrastructures et services sociaux et l'état des équipements. Intuitivement, si impact de la transition vers l'irrigation goutte-à-goutte sur ces critères il y a, cet impact est très indirect et extrêmement ténu. Les résultats de l'approche rationnelle consistant à confronter la liste des *spécificités* aux *critères* présente donc des résultats qui sont intuitivement cohérents et rien ne s'oppose ainsi à ce que l'écartement de ces 3 *critères* soit définitivement acté.
34 *critères* doivent donc être évalués. 11 d'entre eux sont associés au pilier environnemental, 10 au pilier économique et 13 au pilier social. Un certain équilibre entre ces différents piliers est donc, jusqu'ici, respecté.

Les indicateurs

La cadre SAFE associe 57 *indicateurs* aux 34 *critères* à évaluer. Après application de l'algorithme de sélection, 14 de ces 57 *indicateurs* sont considérés comme pertinents pour notre processus d'évaluation (tableaux 23 et 24). Sur ces 14 *indicateurs*, 9 sont relatifs au pilier environnemental, 3 au pilier économique et 2 au pilier social. Les trois quarts des *indicateurs* sont donc éliminés sur base de notre algorithme de sélection. Toutefois, les *indicateurs* sont spécifiques au contexte étudié. Le contexte dans lequel le cadre SAFE fut développé différant assez sensiblement du contexte du CMV 103 de la plaine des Triffa, un tel écrémage n'est donc pas surprenant.
Sur les 43 *indicateurs* éliminés, 14 le sont car ils ne sont pas appropriés à la zone d'étude, 11 car ils ne reflètent pas le point de vue de l'agriculteur (ce qui conduit par ailleurs à écarter 5 *critères* supplémentaires), 4 car la conversion de l'irrigation gravitaire vers l'irrigation goutte-à-goutte est sans impact sur leur valeur et 14 car les données nécessaires à leur calcul ne sont pas disponibles. Les principales raisons de l'élimination des *indicateurs* sont donc, par ordre d'importance, la spécificité de la zone d'étude, les aspects

pratiques liés au calcul des *indicateurs* et la spécificité des objectifs poursuivis. Outre l'aspect contextuel, la divergence d'objectifs poursuivis par les auteurs du cadre SAFE, l'évaluation de la durabilité de l'agriculture, et ceux de notre étude, l'évaluation des performances de l'irrigation du point de vue de l'agriculteur, entraine l'élimination de nombreux *indicateurs*, ce qui rappelle, une fois encore, l'importance d'une définition claire des objectifs préalablement à tout processus de sélection d'indicateurs.

Les indicateurs sélectionnés à ce stade pour le pilier environnemental concernent essentiellement les aspects hydriques et énergétiques. Les *critères* relatifs à la *résistance et résilience de l'écosystème*, à la *vitesse du vent* et à l'*approvisionnement en eau de surface* ont été écartés car ils ne reflètent pas le point de vue de l'agriculteur. L'intégralité des *indicateurs* relatifs à la biodiversité ont été éliminés, à l'exception du *nombre d'espèces cultivées*.

Les indicateurs relatifs au pilier économique, au nombre de 3 sur 10 au départ, sont, pour la majeur partie, éliminés par manque de données disponibles (5 *indicateurs* sur les 7 supprimés). Seuls deux indicateurs sont supprimés car ils ne sont pas appropriés à la zone d'étude.

Enfin, seuls 2 indicateurs sont conservés pour le pilier social. Deux *critères* supplémentaires sont par ailleurs éliminés car ils ne reflètent pas le point de vue de l'agriculteur. La principale cause d'élimination des indicateurs est ici qu'ils ne sont pas appropriés à la zone d'étude (5 *indicateurs* sur les 10 supprimés).

Sur base de la revue bibliographique, quatre *indicateurs* supplémentaires permettent d'évaluer des *critères* jusqu'ici non évalués en remplissant tous les critères de sélection (tableau 24). Ces quatre *indicateurs*, relatifs aux *critères 'garantie de la continuité intergénérationnelle des activités agricoles', 'gestion d'une superficie agricole adéquate', 'conditions de travail optimales'* et *'éducation des travailleurs agricoles'*, concernent les piliers économique et social et sont ajoutés à la liste définitive. Bien que 73 indicateurs aient été recensés à partir de la revue bibliographique, tous les autres indicateurs ont dû être écartés sur base d'au moins un des quatre critères d'exclusion.

Avec 9 indicateurs relatifs au pilier environnemental, 4 au pilier économique et 5 au pilier social, chacun de ces indicateurs étant à la fois adapté aux objectifs poursuivis et au contexte et étant possible à calculer sur base des données accessibles, le cadre d'évaluation est maintenant établi. La mise en place d'une procédure de calcul rigoureuse de ces 18 indicateurs permettra donc d'évaluer les performances de l'irrigation observées dans le CMV 103

de la plaine des Triffa du point de vue de l'agriculteur dans le cadre de la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte.

Discussion

Il est très difficile de définir un nombre optimal d'indicateurs nécessaires pour réaliser un processus d'évaluation des performances de l'irrigation. Si un nombre trop faible d'indicateurs risque d'omettre une série d'informations pertinentes, l'ajout d'indicateurs superflus entraine un cout pour la collecte de données non justifié si la plus-value apportée par les indicateurs supplémentaires n'est pas démontrée (Bos et al. 2005; Lutter and Schnepf 2011). Ainsi, par exemple, le cadre SAFE définit une liste de 96 indicateurs à quantifier pour évaluer la durabilité de l'agriculture wallonne (Peeters et al. 2005). Dans le cadre du projet ALERT, qui vise à évaluer la durabilité de la gestion de l'eau d'un aquifère côtier en Espagne (Van Cauwenbergh et al. 2008), le nombre d'indicateurs sélectionné est de 15 (Van Cauwenbergh 2008). Enfin, une revue de listes d'indicateurs existantes et appliquées à la gestion de l'eau en région méditerranéenne montre que ces listes vont de 20 à 72 indicateurs (Lutter and Schnepf 2011). Avec 18 indicateurs, notre sélection se trouve dans le bas de la gamme observée. Etant données les restrictions propres à ce travail, qui n'intègre que les aspects liés aux questions de *quantité*, elle semble donc avoir une longueur appropriée, assez longue pour prétendre appréhender l'ensemble des aspects de la performance mais assez courte pour être réalistement quantifiée.

Le pilier environnemental est évalué par 9 indicateurs. Ils concernent les aspects énergétiques et hydriques tandis que les indicateurs relatifs aux aspects de biodiversité ont été écartés par manque de données disponibles. Cet état de fait ne pose toutefois pas de problème car il reflète les priorités aussi bien des agriculteurs que des décideurs locaux, pour qui le maintien de la biodiversité est loin d'être une préoccupation majeure dans la zone spécifiquement étudiée. De manière générale, les premières implémentations de politiques environnementales datent, au Maroc, de 2003 et l'adoption d'une première charte environnementale ne remonte qu'à 2011 ; l'implémentation d'un cadre légal relatif à la biodiversité est d'ailleurs une des recommandations explicite des Nations Unies (UN-ECE and UN-ECA 2013). L'absence de données relatives à la biodiversité est donc interprétée comme une absence de préoccupation pour cette thématique et, à ce titre, une sélection appropriée d'indicateurs représentatifs du point de vue des agriculteurs et destinée aux décideurs locaux ne peut que l'ignorer.

Le pilier économique est évalué par 4 indicateurs. Aucun *principe* ni aucun *critère* relatif à ce pilier n'a été écarté. Sept *indicateurs* ont été écartés, deux car ils ne convenaient pas à la zone d'étude et les cinq autres par manque de données disponibles. Un indicateur supplémentaire a ensuite pu être ajouté. Seuls deux indicateurs étant éliminés pour des raisons autres que l'accès aux données, les préoccupations relatives au pilier économique semblent donc très similaires en Belgique et au Maroc. Ce constat n'est pas étonnant. Les aspects économiques sont en effet *a priori* la principale priorité aussi bien des agriculteurs que des décideurs locaux ; il s'agit également d'une préoccupation universellement partagée par les acteurs du monde agricole. La viabilité économique d'un projet, quel qu'il soit, est d'ailleurs généralement une condition nécessaire à son existence. La difficulté d'obtenir des données économiques fiables est également illustrée par les résultats de cette sélection. Les données à caractère économique sont en effet éminemment personnelles et très peu de chiffres officiels existent. Par ailleurs, les agriculteurs sont réticents à transmettre des données économiques précises, même au cours d'entretiens privés.

Le pilier social est évalué par 5 indicateurs, dont seuls 2 proviennent du cadre SAFE original. De nombreux *indicateurs*, ainsi que plusieurs *critères*, ont donc été écartés. Le contexte social est certainement le volet pour lequel la différence est la plus marquée entre l'agriculture belge et l'agriculture marocaine ; il n'est donc pas étonnant que nombre des indicateurs repris dans le cadre SAFE original ne soient ici pas pertinents.

Le processus de sélection des indicateurs ici mis en place permet donc l'identification d'un ensemble d'indicateurs cohérent qui permet une évaluation holistique pertinente des performances de l'irrigation. L'application de l'algorithme de sélection permet d'identifier un nombre raisonnable d'indicateurs pertinents. Ces indicateurs reflètent les préoccupations des acteurs impliqués dans l'agriculture irriguée au sein de la zone d'étude. Chaque indicateur est par ailleurs individuellement pertinent et l'ensemble des indicateurs sélectionnés forme un tout cohérent, ce qui permet une évaluation holistique des performances de l'irrigation tout en rendant possible et significative une lecture détaillée des différents aspects de la performance abordés.

La démarche appliquée est donc concluante. Partant d'un cadre d'évaluation préexistant issu de l'implémentation d'une approche participative, les indicateurs représentent le point de vue des agriculteurs. Grâce à une procédure de sélection rigoureuse et centralisée, le processus d'adaptation de ce cadre au contexte particulier du CMV103 de la plaine des Triffa se fait

facilement et permet d'identifier les indicateurs les plus appropriés. En ce sens, le processus de sélection ici développé répond à la nécessité de mettre en place une approche hybride, combinant les avantages des approches participatives et des approches centralisées, rappelée par de nombreux auteurs (Reed et al. 2006; Van Cauwenbergh 2008).

Tableau 22 : *Principes* conservés pour l'évaluation des performances de l'irrigation et *critères* qui y sont associés dans le cadre SAFE. Les *critères* barrés ne seront pas pris en compte dans l'évaluation des performances de l'irrigation pour les raisons évoquées dans la colonne *Justifications*.

Principes	***Critères***	**Justifications***
Régulation de la stabilité de l'écosystème	Garantie de la résistance et de la résilience du système	
Effet tampon sur l'air	Vitesse du vent adéquatement tamponnée	
Stock de sol	~~Pertes en sol minimisées~~	zone d'étude
Offre d'eau	Approvisionnement en eau de surface Approvisionnement en eau du sol Approvisionnement en eau souterraine	
Effet tampon sur l'eau	~~Régulation des inondations et du ruissellement~~	zone d'étude
Offre d'énergie	Approvisionnement en énergie	
Effet tampon sur les flux d'énergie	Flux d'énergie adéquatement tamponnés	
Stock de ressource biologique	Conservation de la biodiversité Conservation du fonctionnement de la biodiversité Conservation du patrimoine de biodiversité	
Stock d'habitat	Maintien d'un habitat diversifié	
Fonction économique	Revenu de l'exploitation garanti Minimisation de la dépendance aux subsides Optimisation de la dépendance aux finances extérieures Efficience économique des activités agricoles Efficience technique des activités agricoles Optimisation des activités de marché Formation professionnelle des agriculteurs Garantie de la continuité intergénérationnelle des activités agricoles Arrangements fonciers optimaux Capacité d'adaptation des exploitations agricoles	

Tableau 22 (suite)

Principes	***Critères***	**Justifications***
Production de l'agro-écosystème	Compatibilité de la capacité de production avec la demande en nourriture	
	Maintien de la diversité de la production	
	~~Maintien de la qualité de la production~~	*qualité*
	Gestion d'une superficie agricole adéquate	
Bien-être physique de la communauté agricole	Conditions de travail optimales	
	Santé de la communauté agricole	
Bien-être psychologique de la communauté agricole	Education des travailleurs agricoles	
	~~Situation familiale acceptable (y compris la question du genre)~~	impact
	~~Accès aux infrastructures et services sociaux~~	impact
	Intégration dans la société locale et agricole	
	Sentiment d'indépendance	
Bien-être de la société	~~Etat des équipements~~	impact
	~~Niveau de pollution~~	*qualité* (implicite)
	Méthodes de production	
	~~Gout et qualité de la nourriture~~	qualité
	Equité	
	Implication des acteurs	
Information	Valeurs éducatives et scientifiques perpétuées	
	Héritage culturel et spirituel perpétué	

**qualité* : restriction au cadre fixé pour ce travail (les questions de qualité sont écartées)
zone d'étude : non adapté au contexte du CMV 103 de la plaine des Triffa
impact : la confrontation avec les *spécificités* (Tableau 19) indique que la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte sera sans impact sur ce *critère*.

Tableau 23 : *Critères* du pilier environnemental conservés pour l'évaluation des performances de l'irrigation et *indicateurs* qui y sont associés dans le cadre SAFE. Les *indicateurs* barrés ne seront pas pris en compte dans l'évaluation des performances de l'irrigation pour les raisons évoquées dans la colonne *Justifications*. Les *critères* barrés ne seront pas pris en compte car ils ne reflètent pas le point de vue des agriculteurs.

Critères	***Indicateurs***	**Justifications***
~~Garantie de la résistance et de la résilience du système~~	~~Radiation nette / radiation solaire~~	~~agriculteur~~
	~~Productivité primaire de la biomasse~~	~~agriculteur~~
~~Vitesse du vent adéquatement tamponnée~~	~~Organisation de l'occupation du sol~~	~~agriculteur~~
~~Approvisionnement en eau de surface~~	~~Bilan hydrique de surface~~	~~agriculteur~~
Approvisionnement en eau du sol	Pratiques d'irrigation	
	Stress hydrique	
Approvisionnement en eau souterraine	Niveau de la nappe	
	Consommation d'eau	
Approvisionnement en énergie	Production énergétique directe	
Flux d'énergie adéquatement tamponnés	Consommation énergétique directe	
	Consommation d'énergie renouvelable directe	
	Bilan énergétique	
Conservation de la biodiversité	Nombre d'espèces cultivées	
	~~Nombre d'espèces rares ou menacées cultivées~~	données
	~~Nombre d'espèces de bétail~~	impact
	~~Nombre d'espèces de bétail rares ou menacées~~	impact
Conservation du fonctionnement de la biodiversité	~~Nombre d'espèces sauvages dans les prairies permanentes~~	zone d'étude
	~~Activité biologique du sol~~	données
	~~Saturation en espèces de vers de terre~~	données
Conservation du patrimoine de biodiversité	~~Saturation en espèces de papillons~~	~~agriculteur~~
	~~Nombre d'espèces de papillons protégées~~	~~agriculteur~~
	~~Saturation en espèces d'oiseaux~~	~~agriculteur~~
	~~Nombre d'oiseaux protégés~~	~~agriculteur~~
	~~Nombre d'oiseaux concernés par les directives européennes~~	~~agriculteur~~
	~~Saturation en espèces de fleurs sauvages~~	données
	~~Nombre de fleurs sauvages protégées~~	données
	~~Nombre d'espèces sauvages dans les prairies permanentes~~	zone d'étude
	~~Résultat du risque pesticides sur la biodiversité (POCER 2 RS)~~	données
	~~Pression en engrais sur les zones Natura2000~~	zone d'étude
	~~Proportion de prairie à haute valeur biologique~~	zone d'étude
	~~Existence d'équipements spéciaux pour la faune sauvage~~	impact

Tableau 23 (suite)

Critères	***Indicateurs***	**Justifications***
Maintien d'un habitat diversifié	~~Saturation en habitats~~	données
	~~Superficie agricole sous contrat de gestion~~	zone d'étude
	~~Superficie agricole gérée pour le biotope sauvage sans contrat de gestion~~	zone d'étude
	~~Superficie en agriculture biologique~~	zone d'étude

* impact : la confrontation avec les *spécificités* (Tableau 19) indique que la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte sera sans impact sur cet *indicateur*.
zone d'étude : non adapté au contexte du CMV 103 de la plaine des Triffa.
~~agriculteur~~ : ne reflète pas la perspective de l'agriculteur
données : données nécessaires non disponibles

Tableau 24 : *Critères* des piliers économique et social conservés pour l'évaluation des performances de l'irrigation et *indicateurs* qui y sont associés dans le cadre SAFE. Les *indicateurs* barrés ne seront pas pris en compte dans l'évaluation des performances de l'irrigation pour les raisons évoquées dans la colonne *Justifications*. Les *critères* barrés ne seront pas pris en compte car ils ne reflètent pas le point de vue des agriculteurs. Les *indicateurs* écrits en gris et entre parenthèses ne se trouvent pas dans le cadre SAFE original mais ont été ajoutés sur base d'une revue bibliographique.

Critères	***Indicateurs***	**Justifications***
Revenu de l'exploitation garanti	Revenu / travailleur / an	
Minimisation de la dépendance aux subsides	~~% de revenu net venant de subsides~~	zone d'étude
Optimisation de la dépendance aux finances extérieures	~~Capital détenu en propre / capital total~~	données
Efficience économique des activités agricoles	Sorties totales / entrées totales [€] ~~Valeur ajoutée / travailleur~~	 données
Efficience technique des activités agricoles	~~Sorties totales / entrées totales [J]~~	données
Optimisation des activités de marché	Diversité des sources de revenu	
Formation professionnelle des agriculteurs	~~Années d'expérience professionnelle~~	données
Garantie de la continuité intergénérationnelle des activités agricoles	~~Existence d'une nouvelle génération repreneuse~~ (statut foncier pérenne)	zone d'étude
Arrangements fonciers optimaux	--	
Capacité d'adaptation des exploitations agricoles	~~Index d'adaptabilité~~	données

Tableau 24 (suite).

Critères	***Indicateurs***	**Justifications***
Compatibilité de la capacité de production avec la demande en nourriture	~~Consommation / production~~	~~agriculteur~~
Maintien de la diversité de la production	Diversité des types de nourriture	
Gestion d'une superficie agricole adéquate	-- (pourcentage de superficie effectivement irrigué)	
Conditions de travail optimales	~~Heures par an pour le travail agricole~~ (emploi de travailleurs pour le travail agricole quotidien)	données
Santé de la communauté agricole	~~Nombre de jours d'incapacité de travail~~	zone d'étude
Education des travailleurs agricoles	~~Cours supplémentaires~~ (niveau de formation du gestionnaire)	zone d'étude
Intégration dans la société locale et agricole	~~Membre d'organisations non-agricoles~~	données
Sentiment d'indépendance	~~Sentiment d'indépendance par rapport aux subsides~~ Sentiment d'indépendance par rapport aux contrats	zone d'étude
Méthodes de production	~~Bien-être animal~~	impact
Equité	~~Percentile 20% du revenu maximum / percentile 20% du revenu minimum~~	~~agriculteur~~
Implication des acteurs	~~Portes ouvertes~~	zone d'étude
Valeurs éducatives et scientifiques perpétuées	~~Portes ouvertes~~	zone d'étude
Héritage culturel et spirituel	--	

* impact : la confrontation avec les *spécificités* (Tableau 19) indique que la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte sera sans impact sur cet *indicateur*.
zone d'étude : non adapté au contexte du CMV 103 de la plaine des Triffa.
~~agriculteur~~ : ne reflète pas la perspective de l'agriculteur
données : données nécessaires non disponibles

Conclusion

Cette section a pour objectif de définir les critères et indicateurs de performance qui seront utilisés pour identifier les aspects de la *performance* qui sont modifiés suite au processus de conversion du point de vue de l'agriculteur. La méthodologie développée s'appuie sur le cadre SAFE, élaboré pour évaluer la durabilité de l'agriculture en Belgique. Il s'agit d'un cadre organisé en niveaux hiérarchisés, les *principes* puis les *critères* puis les *indicateurs*. Ces niveaux sont un à un adaptés au contexte de la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans la plaine des Triffa.

La méthodologie d'adaptation consiste à confronter chaque niveau hiérarchique à un certain nombre de critères de sélection. Lorsque le niveau hiérarchique ne remplit pas le critère de sélection, il est supprimé, ainsi que les niveaux hiérarchiques inférieurs qui lui sont rattachés. Les critères de sélection appliqués sont relatifs à l'impact du changement de technique d'irrigation, aux particularités de l'agriculture telle que pratiquée dans la zone d'étude, à l'objectif d'évaluation des performances du point de vue de l'agriculteur, aux limites fixées dans le cadre de ce travail et aux données disponibles. Enfin, les résultats sont passés en revue et certains indicateurs sont ajustés ou ajoutés si nécessaire.

L'application systématique de cet algorithme de sélection retient 15 *principes* sur les 19 du cadre SAFE original. 34 *critères* sont ensuite conservés pour évaluer ces principes et 14 *indicateurs* pour évaluer ces *critères*. Quatre *indicateurs* sont finalement ajoutés sur base d'une revue bibliographique. La liste finale compte donc 18 *indicateurs*, 9 étant relatifs au pilier environnemental, 4 au pilier économique et 5 au pilier social. L'évaluation de l'ensemble de ces indicateurs permettra de répondre aux objectifs fixés.

Le principal critère d'élimination des *indicateurs* relatifs au pilier environnemental est le manque de données disponibles, en particulier les données liées à la notion de biodiversité. Cela reflète l'absence de préoccupation pour cette question au sein de la zone d'étude, en particulier du point de vue des agriculteurs, et n'est donc pas problématique au vu des objectifs ici poursuivis. Le pilier économique est assez peu modifié au niveau des *principes* et des *critères* mais de nombreux *indicateurs* sont écartés par manque de données disponibles. Les préoccupations économiques sont une des principales priorités du monde agricole, qu'il soit belge ou marocain, et une telle similarité au niveau des *principes* et des *critères* était donc prévisible. Le caractère sensible des données relatives au pilier économique explique le nombre important d'*indicateurs* supprimés par

rapport à ce critère de sélection. Enfin, le pilier social est fortement remanié, tous les critères de sélection ayant ici une influence. La différence entre les contextes sociaux belges et marocains, très marquée, explique cet état de fait.

La démarche appliquée a donc permis de réaliser une sélection de 18 indicateurs dont la quantification permettra d'identifier les aspects de la *performance* qui sont modifiés suite au processus de conversion du point de vue de l'agriculteur. Le processus de sélection de ces indicateurs répond à la nécessité de mettre en place une approche hybride, combinant les avantages des approches participatives et des approches centralisées.

4.3 - Evaluation des performances de l'irrigation dans un contexte de transition à l'irrigation goutte-à-goutte

Pour rappel, l'objectif du processus d'évaluation des performances de l'irrigation ici implémenté est d'identifier les objectifs effectivement poursuivis par l'agriculteur lors de la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans le périmètre irrigué de la plaine des Triffa au Maroc. La démarche qui vient d'être présentée a permis de sélectionner un panel de 18 indicateurs dont la quantification devrait permettre cette identification.

Le panel d'indicateurs sélectionné comprend 18 indicateurs, dont 9 sont associés au pilier environnemental, 4 au pilier économique et 5 au pilier social (tableau 25). Ces indicateurs seront quantifiés pour les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire puis pour les agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte. La valeur de ces indicateurs chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire sera utilisée comme valeur de référence. Elle sera comparée à la valeur de ces indicateurs chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte. Les objectifs effectivement poursuivis par les agriculteurs lors de la mise en œuvre de cette conversion pourront ainsi être identifiés.

Méthodologie

Calcul des indicateurs

Les problèmes d'accès à des données de qualité sont légion dans le domaine de l'irrigation (Bastiaanssen et al. 2007) et la zone ici étudiée ne fait pas exception à cette règle. Si, grâce au travail développé dans le chapitre 3 de ce document consacré à l'*efficience* de l'irrigation, la plupart des indicateurs relatifs au pilier environnemental pourraient être quantifiés pour l'ensemble des agriculteurs de la zone d'étude, il n'en va pas de même pour les indicateurs associés aux piliers économique et social. La quantification des indicateurs pour l'ensemble des agriculteurs de la zone d'étude n'a donc pas pu être envisagée.

Parmi les données relatives aux piliers économique et social, certaines sont directement disponibles ou peuvent être facilement déduites de bases de données officielles concernant l'ensemble des agriculteurs. C'est ainsi le cas

du nombre de cultures exportées et du pourcentage de terres irriguées. D'autres données existent en théorie dans des bases de données officielles mais n'ont pu être acquises dans le cadre de ce travail. Il s'agit par exemple des données liées au statut foncier. Enfin, un certain nombre de données ne sont pas recensées et leur acquisition, quand elle est possible, passe impérativement par une collecte directe auprès de chaque agriculteur. Les données de ce type sont, par exemple, le revenu des activités agricoles, les entrées et sorties financières des exploitations, les sources de revenu annexes, les données relatives au travail quotidien et à la main d'œuvre employée par les agriculteurs, le niveau de formation des gestionnaires et les filières de vente.

La quantification des indicateurs associés aux piliers économique et social passe donc impérativement par une collecte directe de données auprès des agriculteurs. Pour cette raison, cette quantification est inenvisageable pour l'ensemble des agriculteurs de la zone d'étude. Les données récoltées dans le cadre des entretiens menés auprès d'un échantillon représentatif d'agriculteurs en avril 2012 puis en mars 2013 ont donc été utilisées pour quantifier ces indicateurs. Au total, les indicateurs ont ainsi pu être quantifiés pour 25 exploitations, 13 pratiquant l'irrigation gravitaire et 12 l'irrigation goutte-à-goutte pour un total de 56 parcelles irriguées. A partir de ces données, les indicateurs ont pu être quantifiés en utilisant les formules résumées au tableau 25. Le détail des calculs et hypothèses effectués est présenté en annexe 4.

Tableau 25 : *Indicateurs* sélectionnés pour évaluer les performances de l'irrigation du point de vue de l'agriculteur dans le contexte de la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans le CMV103 de la plaine des Triffa (Maroc Oriental).

Pilier	*Indicateurs*	Formule	Mesure*
Environnemental	Pratiques d'irrigation	% de terres irriguées***	E
	Stress hydrique	Nombre de semaines de stress/an (SWC<RAW)	P
	Niveau de la nappe	Niveau de la nappe [masl]	ZE
	Consommation d'eau (nappe)	Quantité d'eau consommée/an (ΣI_{gw})	E
	Production énergétique directe	Produits énergétiques exportés directs (méthanisation, éolien, solaire) ou indirects (agro-carburants) [litres d'essence/ha]	E
	Consommation énergétique directe	Energie directe (carburant, électricité, lubrifiants) utilisée pour la production agricole [litres d'essence /ha]	E
	Consommation d'énergie renouvelable directe	Energie directe (carburant, électricité, lubrifiants) utilisée pour la production agricole qui est d'origine renouvelable [litres d'essence GJ/ha]	E
	Bilan énergétique	Energie (directe et indirecte) produite – énergie (directe et indirecte) utilisée [litres d'essence]	E
	Nombre d'espèces cultivées	Trivial	E

Tableau 25 (suite)

Pilier	*Indicateurs*	Formule	Mesure*
Economique	Revenu / travailleur / an	Revenu/ha**	E'
	Entrées totales / sorties totales [€]	Entrées totales/sorties totales pour la production agricole [-]	E'
	Diversité des sources de revenu	Nombre de sources de revenu agricole, directement liées à la production (nombre de cultures vendues, lait, animaux…) ou non (contrats de gestion, agrotourisme…), pas les sources de revenu non agricoles [#]	E
	Pérennité du statut foncier	héritier = 1, locataire = 2, propriétaire = 3 **	E
Social	Diversité des types de nourriture	Nombre de cultures différentes commercialisées [#]	E
	Pourcentage de superficie effectivement irrigué	% de terres irriguées***	E
	Emploi de travailleurs pour le travail agricole quotidien	Formule composite intégrant le statut du gestionnaire officiel de l'exploitation et des travailleurs effectuant le travail quotidien (valeur de 1 à 5, 1 = propriétaire travaillant seul, 5 = gestionnaire employé travaillant avec des ouvriers)**	E'
	Niveau de formation du gestionnaire	Niveau de formation (expérience = 1, technique = 2, supérieur = 3)**	E'
	Sentiment d'indépendance par rapport aux contrats	Filière de vente (100% export = totalement dépendant, 100% marché local = totalement indépendant, combinaison des filières de vente = niveau intermédiaire de dépendance)**	E

*E : mesure à l'échelle de l'exploitation, E' : mesure à l'échelle de l'exploitation (pour 16, 20 ou 21 exploitations sur les 25), P : mesure à l'échelle de la parcelle, ZE : mesure à l'échelle de la zone d'étude

**Les formules de calcul de ces *indicateurs* ont été adaptées par rapport aux données effectivement disponibles et à la réalité de terrain.

***Cette formule est utilisée deux fois, pour le calcul de deux *indicateurs* différents.

Analyse de la performance

Une fois les indicateurs quantifiés, il convient de confronter leurs valeurs en fonction du type d'irrigation, l'irrigation gravitaire étant considérée comme la situation de référence à laquelle l'irrigation goutte-à-goutte est confrontée. Pour ce faire, trois analyses sont effectuées.

Tout d'abord, une analyse exploratoire visant à appréhender les résultats le plus finement possible est réalisée. Les valeurs des différents indicateurs sont systématiquement passées en revue, décrites, commentées et analysées afin de mettre en lumière les conclusions les plus évidentes qui peuvent être tirées de ces observations.

Ensuite, pour chaque indicateur, une analyse de la variance pour les deux types d'irrigation est implémentée. L'analyse de la variance (ANOVA) permet d'analyser la différence entre les moyennes de deux échantillons et, ainsi, de déterminer si cette différence est statistiquement significative (Tarlow 2016). Ici, cette analyse sera appliquée pour chaque indicateur afin de déterminer si la valeur moyenne de l'indicateur diffère significativement selon le type d'irrigation. De cette manière, une éventuelle différence claire entre la valeur d'un indicateur lorsque l'irrigation gravitaire est pratiquée et sa valeur lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée sera mise en évidence.

Néanmoins, le type d'irrigation pratiqué n'est pas le seul facteur qui influence la valeur des indicateurs. La variabilité intrinsèque des exploitations au sein de la zone d'étude, par exemple au niveau de leur gestion, engendre elle-aussi des différences de valeurs pour ces indicateurs. Ces différences, qui ne sont pas directement liées au type d'irrigation pratiqué sur l'exploitation, risquent donc d'occulter l'effet du type d'irrigation sur la valeur des indicateurs. Une analyse de la variance telle qu'implémentée précédemment, qui n'intègre que la valeur des indicateurs et mélange ainsi l'influence du type d'irrigation et de la variabilité intrinsèque des exploitations, risque donc de s'avérer insuffisante pour identifier l'effet du type d'irrigation si celui-ci est de moindre ampleur que l'effet de la variabilité intrinsèque des exploitations.

Pour prendre explicitement en compte cette variabilité intrinsèque des exploitations et ainsi contourner ce problème, un modèle *ESR* est appliqué pour chaque indicateur. Pour rappel, cette approche, présentée en détails plus tôt dans ce document (voir section 3.2), permet cette prise en compte en « permettant la détermination conjointe des variables discrètes [la technologie d'irrigation] et des résultats que ces variables affectent [la valeur

de l'indicateur] » (Mare and Winship 1987) sur base de variables faiblement ou fortement exogènes. Une relation entre ces variables, qui peuvent représenter, au moins partiellement, la variabilité intrinsèque de la gestion des exploitations, et la valeur des indicateurs est alors obtenue pour chaque type d'irrigation (équations 9 et 10).

Au chapitre 3, les indicateurs les plus pertinents, dans le contexte de ce travail, de la gestion (*M*) au sein des exploitations furent identifiés comme étant la *taille des exploitations* et leur *spécialisation*. Afin d'intégrer l'effet potentiel de cette gestion sur la valeur des indicateurs de performance, ces variables seront donc utilisées pour implémenter l'approche *ESR*. Cette approche nécessite également une variable parfaitement indépendante du type d'irrigation. La seule variable disponible répondant à ce critère étant la *stabilité du statut foncier*, elle sera ici encore utilisée dans l'équation de sélection. D'autres variables pourraient évidemment être utilisées pour appréhender finement la variabilité des indicateurs voire mettre en évidence des corrélations jusqu'ici non détectées. Toutefois, la faible quantité de données disponibles rend cet exercice compliqué. Plusieurs autres variables ont en effet été testées mais aucune ne s'avère concluante, dans le sens où l'approche *ESR* ne donne aucun résultat lorsque ces variables sont utilisées.

Les variables identifiées comme pertinentes au chapitre 3, elles-mêmes identifiées grâce à une méthodologie spécifique, seront donc ici utilisées pour implémenter l'approche *ESR*. Pour un indicateur donné, l'analyse des différences entre la relation obtenue pour les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire et celle obtenue pour les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte permettra alors d'appréhender plus finement l'impact de la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte en intégrant l'effet de la gestion sur la valeur de cet indicateur.

Présentation des résultats

La synthèse des valeurs des indicateurs est présentée au tableau 26. Deux indicateurs ont des valeurs constantes pour toutes les exploitations : il s'agit des indicateurs 5 et 7, qui concernent la production d'énergie et la consommation d'énergie renouvelable. Aucune exploitation ne produisant, directement ou indirectement, d'énergie et l'utilisation d'énergie renouvelable n'étant pas encore d'actualité dans la zone étudiée, ces deux indicateurs ont une valeur constante égale à 0 et leur analyse n'a donc pas lieu d'être. Par ailleurs, plusieurs indicateurs sont redondants. Les indicateurs 1 et 15 sont identiques et l'analyse d'un des deux est donc valable pour l'autre. En outre, les indicateurs 6 et 8 prennent

systématiquement la même valeur. Ceci s'explique car l'indicateur 8 vaut la différence entre les indicateurs 5 et 6 et que l'indicateur 5 est constant et vaut 0. L'analyse de l'indicateur 8 est donc superflue et seul l'indicateur 6 devra être analysé.

Les résultats de l'analyse de la variance permettent de mettre en lumière les observations les plus évidentes (tableau 27). 6 indicateurs prennent des valeurs significativement différentes selon le type d'irrigation. Sur le plan environnemental, la consommation d'énergie est ainsi plus élevée dans les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte tandis que le nombre d'espèces cultivées y est moindre. Sur le plan économique, le nombre de sources de revenu est plus faible dans ces exploitations. Finalement, sur le plan social, le recours à de la main d'œuvre extérieure y est plus élevé (indicateur 16), de même que le niveau de formation et le niveau de dépendance par rapport aux contrats.

Au niveau des parcelles agricoles, le nombre de semaines de stress par an présente des valeurs significativement différentes lorsqu'on analyse l'effet croisé du type d'irrigation et du type de culture. Pour les cultures d'agrumes, 34 jours de stress hydrique sont en moyenne observés sur les parcelles irriguées par voie gravitaire et 47 sur les parcelles irriguées au goutte-à-goutte. Pour les autres types de culture, 106 jours de stress par an sont en moyenne observés pour les parcelles irriguées par voie gravitaire tandis que ce nombre tombe à 30 pour les parcelles irriguées au goutte-à-goutte.

Enfin, l'indicateur 3 (niveau de la nappe) ne peut être calculé individuellement pour chaque exploitation agricole. Les résultats présentés précédemment dans ce document (section 3.3) seront donc utilisés pour cet indicateur. Pour rappel, ces résultats indiquent une possible diminution des pressions sur la nappe suite au déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte. L'irrigation induit en effet une diminution moyenne du niveau de la nappe d'au moins 2.7 cm/mois lorsque moins de 5% des superficies sont irriguées en goutte-à-goutte tandis que, lorsque plus de 10% des superficies le sont, cette diminution tombe à 0.7 cm/mois.

D'après les analyses de la variance, les autres indicateurs ne présentent pas de différences évidentes qui peuvent être mises en lien avec le type d'irrigation. L'implémentation de la méthode *ESR* pourrait permettre de mettre en évidence des différences qui ne sont pas détectables avec les méthodes appliquées jusqu'ici.

Tableau 26 : Synthèse des valeurs obtenues pour les indicateurs de performance de l'irrigation

	Indicateur	Gravitaire (13 exploitations)			Goutte-à-goutte (12 exploitations)		
		Moy.	Ec. type	[min-max]	Moy.	Ec. type	[min-max]
1	% de terres irriguées [%]	79	19	[33-100]	78	21	[16-88]
2	Jours de stress/an [#]*	63	824	[0-338]	42	75	[0-326]
3	Niveau de la nappe [masl]**	--	--	--	--	--	--
4	Quantité d'eau souterraine consommée [mm]	1168	1479	[0-4336]	2544	2452	[37-7704]
5	Production énergétique [litres d'essence/ha]	0	0	[0-0]	0	0	[0-0]
6	Consommation énergétique [litres d'essence /ha]	434	550	[0-1611]	2582	2172	[225-7206]
7	Consommation d'énergie renouvelable [litres d'essence /ha]	0	0	[0-0]	0	0	[0-0]
8	Bilan énergétique [litres d'essence /ha]	434	550	[0-1611]	2582	2172	[225-7026]
9	Nombre d'espèces cultivées [#]	2.8	1.0	[1-4]	1.8	0.9	[1-3]
10	Revenu/ha [Dh]	8342	13022	[-9668-31100]	12786	15224	[-10257-45760]
11	Entrées/sorties [Dh/Dh]	1.9	1.1	[0.5-4]	1.8	0.7	[0.7-3.0]
12	Sources de revenu [#]	4.1	1.4	[2-6]	2.6	1.2	[1-4]
13	Pérennité du statut foncier [1='-', 3='+']	2.3	0.9	[1-3]	1.8	0.9	[1-3]
14	Cultures commercialisées hors de l'exploitation [#]	2.1	0.9	[1-4]	1.5	0.7	[1-3]
15	% de terres irriguées [%]	79	19	[33-100]	78	21	[16-88]
16	Travail quotidien et emploi[1='-', 5='+']	2	1.1	[1-4]	4	1.7	[1-5]
17	Niveau de formation [1='-', 3='+']	1	0	[1-1]	1.7	1	[1-3]
18	Indépendance par rapport aux contrats [0='-', 2='+']	1.2	0.7	[0-2]	0.5	0.7	[0-2]

*En raison d'un biais dans la méthode de calcul, le jour de nombre de stress par an calculé pour la plus grosse des exploitations (8 parcelles irriguées en goutte-à-goutte) est de 365. Afin de ne pas biaiser les valeurs de cet indicateur, ces parcelles ne sont pas intégrées aux chiffres donnés pour cet indicateur.

**Le niveau de la nappe ne peut être calculé individuellement pour chaque exploitation mais l'impact de la technique d'irrigation sur le niveau de la nappe a été quantifié plus tôt dans ce document. Le déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte se traduit par une diminution des pressions sur la nappe.

Tableau 27 : Synthèse des résultats des analyses de la variance ANOVA (P>F = p_{val}) pour l'analyse d'un facteur (*type d'irrigation*) et pour l'analyse de l'interaction de deux facteurs (*type d'irrigation* et *spécialisation*)

		P>F (p_{val})	
		irrigation	*irrigation X spécialisation*
1	% de terres irriguées [%]	0.83	0.74
2	Semaines de stress/an [#]	0.38	0.06*'
3	Niveau de la nappe [masl]	--	--
4	Quantité d'eau souterraine consommée [mm]	0.10	0.27
5	Production énergétique [litres d'essence /ha]	--	--
6	Consommation énergétique [litres d'essence /ha]	<0.01**	0.24
7	Consommation d'énergie renouvelable [l d'essence/ha]	--	--
8	Bilan énergétique [litres d'essence /ha]	--	--
9	Nombre d'espèces cultivées [#]	0.01**	0.8
10	Revenu/ha [Dh]	0.48	0.55
11	Sorties/entrées [Dh/Dh]	0.68	0.16
12	Sources de revenu [#]	0.01**	0.26
13	Pérennité du statut foncier [1='-', 3='+']	0.22	0.25
14	Cultures commercialisées hors de l'exploitation [#]	0.10	0.33
15	% de terres irriguées [%]	--	--
16	Travail quotidien et emploi [1='-', 5='+']	0.01**	NaN
17	Niveau de formation [1='-', 3='+']	0.06*	NaN
18	Indépendance par rapport aux contrats [0='-', 2='+']	0.02**	0.96

*significatif (p_{val}<0.1)

*'significatif (p_{val}<0.1) pour une Anova '*irrigation X agrumes*' (pas de notion de *spécialisation* à l'échelle parcellaire)

**très significatif (p_{val}<0.05)

Les résultats de la mise en place de la méthode *ESR* sont présentés au tableau 28. L'implémentation de cette approche sur base des variables précédemment identifiées comme pertinentes pour représenter la gestion (*M*) de l'exploitation, à savoir la *taille de l'exploitation* et la *spécialisation* comme variables explicatives des équations de régression et ces mêmes variables et le *statut foncier* comme variables de l'équation de sélection, donne des résultats significatifs pour les indicateurs 9 (le nombre d'espèces cultivées), 12 (le nombre de sources de revenu) et 18 (l'indépendance par rapport aux contrats). En utilisant ces variables pour les autres indicateurs, l'algorithme ne converge pas et aucune régression n'est donc obtenue.

Tableau 28 : Synthèse des résultats de l'implémentation de la méthode *ESR* pour les indicateurs 9 (nombre d'espèces cultivées), 12 (nombre de sources de revenu) et 18 (indépendance par rapport aux contrats). Le nombre d'observations est de 25. La valeur indiquée est le coefficient associé au facteur dans l'équation de régression, la valeur entre parenthèses indique la signifiance statistique (*P*>|*z*|) de ce coefficient. La dernière ligne indique la signifiance statistique (*P*>χ^2) de la régression dans son ensemble.

	Coefficients (P>|z|)		
	Indicateur 9	Indicateur 12	Indicateur 18
Equation de sélection (goutte-à-goutte)			
Taille de l'exploitation	0.51 (0.112)	0.47 (0.148)	0.52 (0.005)
Spécialisation	1.51 (0.056)	1.37 (0.117)	1.29 (0.021)
Statut foncier instable	1.31 (0.086)	1.19 (0.142)	1.27 (0.033)
Terme indépendant	-3.90 (0.010)	-3.68 (0.025)	-3.57 (0.004)
Régime 1 (goutte-à-goutte)			
Taille de l'exploitation	-0.002 (0.309)	0.0003 (0.930)	0.004 (0.002)
Spécialisation	-2.67 (0.002)	-2.45 (0.010)	-0.24 (0.563)
Terme indépendant	4.69 (0.000)	5.33 (0.000)	0.69 (0.044)
Régime 2 (gravitaire)			
Taille de l'exploitation	0.23 (0.272)	0.07 (0.779)	0.14 (0.290)
Spécialisation	-0.62 (0.395)	-1.86 (0.030)	0.90 (0.055)
Terme indépendant	2.28 (0.007)	4.68 (0.000)	0.53 (0.404)
P>χ^2 (modèle global)	0.001	0.034	0.008

Pour ces trois indicateurs, l'approche *ESR* se révèle très significative. Au niveau de l'équation de sélection, ces trois implémentations sont par ailleurs très cohérentes. La taille de l'exploitation et le niveau de spécialisation influencent positivement le passage au goutte-à-goutte, de même que l'instabilité du statut foncier, ce qui est surprenant. Cette influence de l'instabilité du statut foncier rejoint toutefois les conclusions de l'implémentation de l'approche *ESR* réalisée au chapitre 3. La pertinence statistique de cette observation varie par ailleurs d'une implémentation de l'approche *ESR* à l'autre. L'influence de la *taille de l'exploitation* et de la *spécialisation* rejoint les résultats obtenus à la section 3.2.

Pour l'indicateur 9 (nombre d'espèces cultivées), les conclusions sont similaires peu importe le type d'irrigation. Les coefficients obtenus sont significatifs, sauf pour la taille de l'exploitation. Un fort taux de spécialisation est négativement corrélé au nombre d'espèces cultivées, ce qui est attendu étant donnée la corrélation évidente entre cet indicateur (nombre d'espèces cultivées) et ce taux de spécialisation tel que défini dans ce travail. La seule différence notable réside dans la valeur du terme indépendant,

significativement plus bas lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée. Toutefois, cette conclusion ressortait déjà aux résultats de l'analyse de la variance et l'apport de l'approche *ESR* par rapport à cet indicateur est donc à peu près nul.

L'application de l'*ESR* à l'indicateur 12 (nombre de sources de revenu) apporte des conclusions parfaitement identiques. L'influence évidente du nombre d'espèces cultivées sur le nombre de sources de revenu, chaque culture différente étant considérée comme une source de revenu différente, explique cette similitude, qui n'a donc rien de surprenant.

Enfin, lorsqu'appliquée à l'indicateur 18 (indépendance par rapport aux contrats), l'*ESR* indique une influence légère mais statistiquement très significative de la taille de l'exploitation lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée. Cet effet persiste mais sa signifiance est toutefois nettement moindre si l'exploitation de 400 ha est retirée de l'échantillon ; le modèle dans son ensemble n'est par contre plus significatif, ce qui illustre l'influence de cette seule exploitation. Pour l'irrigation gravitaire, le taux de spécialisation influence positivement cette indépendance.

En résumé, une première lecture des valeurs prises par les indicateurs permet d'identifier 14 indicateurs pertinents à analyser, les 4 autres étant soit redondants soit invariables. L'ensemble des méthodes d'analyse ici implémentées montre que la valeur de 8 d'entre eux est influencée par le type d'irrigation pratiquée, la variabilité des trois derniers ne pouvant en rien y être reliée. Sur les 18 indicateurs initiaux, près de la moitié sont donc intéressants à discuter afin d'appréhender l'impact de la transition de l'irrigation gravitaire vers l'irrigation goutte-à-goutte en terme de performance du point de vue de l'agriculteur.

Analyse des résultats

14 indicateurs s'avèrent donc pertinents à analyser. Parmi ceux-ci, 6 semblent être parfaitement indépendants au type d'irrigation. Ces 6 indicateurs sont l'indicateur 1 (% de terres irriguées), l'indicateur 4 (consommation d'eau souterraine), l'indicateur 10 (revenu/ha), l'indicateur 11 (rapport entre les entrées et les sorties financières), l'indicateur 13 (pérennité du statut foncier) et l'indicateur 14 (nombre de cultures commercialisées hors de l'exploitation).

La moyenne et l'écart type du *% de terres irriguées* sont identiques quel que soit le type d'irrigation (tableau 26). Cette valeur serait donc déterminée par des contraintes ou des choix de l'agriculteur parfaitement indépendants du type d'irrigation (et ici indéterminés) et une variation du pourcentage de

terres irriguées ne semble donc être, en aucun cas, un quelconque moteur dans la décision de l'agriculteur d'adopter ou non l'irrigation goutte-à-goutte. La consommation d'eau souterraine est, en moyenne, plus élevée lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée mais cette différence n'est pas statistiquement significative bien que la p_{value} de l'analyse de la variance soit assez faible (0.10, tableau 27).

Le revenu et le rapport entre entrées et sorties financières ne diffèrent pas significativement selon le type d'irrigation. Leur variabilité est par ailleurs très élevée. Ces données doivent toutefois être interprétées avec précaution en raison de l'incertitude particulièrement importante associées aux données d'ordre financier.

La pérennité du statut foncier ne présente aucun lien statistique avec le type d'irrigation. Cette observation semble *a priori* étonnante puisque la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte, qui suppose des investissements importants qui ne peuvent être rentabilisés qu'à long terme, semble incompatible avec un statut foncier instable. Plusieurs auteurs observent d'ailleurs une forte corrélation entre le type d'irrigation et le statut foncier (*e.g.* Salhi et al. 2012; Burnham et al. 2015). Même une classification binaire des exploitations en *statut stable* ou *statut instable* ne montre aucune corrélation avec le type d'irrigation. Bien que cela soit étonnant, il faut donc acter qu'une parfaite indépendance entre le type d'irrigation et le statut foncier est ici observée. Les résultats des différentes approches *ESR* implémentées dans ce document n'apportent pas plus d'éclaircissement. Dans trois de ces approches (sur les cinq implémentées), l'instabilité du statut foncier influence en effet significativement le type d'irrigation, mais deux fois positivement pour une fois négativement. Cette absence de corrélation claire pourrait s'expliquer par le fait que les agriculteurs adoptant la technologie goutte-à-goutte peuvent présenter deux profils distincts. La plupart des agriculteurs passent à la technologie goutte-à-goutte en profitant des subsides du gouvernement marocain, ce qui se traduit par des investissements importants liés aux études techniques, au matériel de pompage, filtration et fertigation et, surtout, à la construction d'un bassin de stockage. Ce choix implique inévitablement une certaine stabilité foncière. Une petite partie des agriculteurs passent toutefois à la technologie goutte-à-goutte sans avoir recours à des investissements si importants, en achetant du matériel bon marché et en se passant de système de filtration/fertigation et de bassin de stockage, l'eau étant alors systématiquement pompée dans la nappe. Cette deuxième catégorie d'agriculteurs pourrait dès lors se permettre

ces investissements plus abordables, même en cas de précarité du statut foncier, ce qui pourrait expliquer l'absence de corrélation observée.
Enfin, le nombre moyen de cultures commercialisées hors de l'exploitation diminue lors du passage au goutte-à-goutte mais cette diminution n'est pas statistiquement significative au regard de la variance (p_{value}*=0.10*, tableau 27) et ne sera donc pas discutée ici.

L'aspect environnemental

La plupart des indicateurs environnementaux pertinents à analyser sont sensibles au type d'irrigation. Les indicateurs 5, 7 et 8 ayant été jugés non pertinents pour notre analyse, seuls les indicateurs 1 (le pourcentage de terres irriguées) et 4 (la consommation d'eau souterraine) restent insensibles au type d'irrigation. Les indicateurs 2 (le nombre de semaines de stress hydrique), 3 (le niveau de la nappe phréatique), 6 (la consommation d'énergie) et 9 (le nombre d'espèces cultivées) y sont d'une manière ou d'une autre sensibles.
Seul indicateur calculé à l'échelle de la parcelle, le nombre moyen de jours de stress par an observé est de 63 pour l'irrigation gravitaire et de 42 pour l'irrigation goutte-à-goutte. Précisons que la plus grande des exploitations de l'échantillon (8 parcelles) a été écartée de l'analyse car un biais dans la méthodologie de calcul engendrait, pour ses parcelles, un stress hydrique permanent. Les valeurs données concernent donc 20 parcelles irriguées en goutte-à-goutte et 28 par voie gravitaire. Au vu de la variance élevée, cette différence n'est toutefois pas significative si on ne regarde que le type d'irrigation ; prendre en compte la combinaison du type d'irrigation avec le type de culture, en particulier la distinction entre cultures d'agrumes et autres cultures, permet par contre de tirer des conclusions statistiquement significatives (tableau 29). En analysant les cultures d'agrumes uniquement, les différences, selon le type d'irrigation, sont statistiquement très significatives (p_{value}*=0.005*) et indiquent un stress plus fréquent sur les parcelles irriguées au goutte-à-goutte. Appliquer la même analyse aux autres cultures est par contre hasardeux. La valeur élevée observée pour l'irrigation gravitaire résulte de la présence majoritaire, dans ce groupe, des cultures de nèfles, fréquemment irriguées grâce à l'eau du barrage uniquement, ce qui limite *de facto* les quantités d'eau appliquées, et surtout des cultures de céréales, rarement commercialisées et donc peu irriguées. A l'inverse, lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée, ces cultures sont exclusivement des cultures de pommes de terre, betteraves et autres légumes maraichers. Ces cultures présentent donc des profils très différents et

interpréter les différences de nombre de jours de stress observé en termes de technique d'irrigation serait erroné. Il semble dès lors compliqué de tirer une conclusion claire quant à cet indicateur. Dans le cas des cultures d'agrumes, le passage à l'irrigation goutte-à-goutte semble toutefois augmenter le nombre de jours de stress hydrique par an.

Tableau 29 : Nombre de jours de stress hydrique par an (coefficient de stress hydrique $K_s<1$) par type d'irrigation et de culture (moyenne ± écart type).

		Irrigation	
		Gravitaire	Goutte-à-goutte
Culture d'agrumes	0 (non)	106 ± 104	30 ± 25
	1 (oui)	34 ± 48	47 ± 89

Le niveau de la nappe pourrait être positivement influencé par le déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte. Cette observation n'est cependant réalisée que sur l'ensemble de la zone d'étude, le calcul de niveaux de nappe individuels pour chaque exploitation n'étant pas réalisable. Comme expliqué au chapitre 3, sur l'ensemble de la zone d'étude, le déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte se traduit par une augmentation du volume total d'irrigation appliqué. Les volumes appliqués lorsque l'irrigation gravitaire est pratiquée étant suffisants, le surplus est majoritairement drainé. Ce surplus provient en partie de la nappe et en partie du barrage ; le bilan est positif pour la nappe et le déploiement de l'irrigation se traduit par une diminution nette des pressions sur la nappe. L'interprétation de cet indicateur est toutefois délicate puisque son échelle de mesure, sur l'ensemble de la zone d'étude, diffère nettement de celle des autres indicateurs.

L'absence de différence quant à la quantité d'eau souterraine consommée tend à confirmer cette hypothèse. Le modèle développé à la section 3.3 montre en effet que l'effet de l'irrigation sur la nappe est très sensible à la proportion d'eau pompée. Les valeurs de l'indicateur 4 (consommation d'eau souterraine) étant indépendantes au type d'irrigation, il est probable que la conversion au goutte-à-goutte ne s'accompagne pas d'une modification sensible de la proportion d'eau pompée. La diminution de pression sur la nappe associée au passage à l'irrigation goutte-à-goutte pourrait donc être tangible.

La consommation d'énergie varie sensiblement et significativement selon que l'exploitation soit irriguée en irrigation gravitaire ou en irrigation goutte-à-goutte, où elle est nettement plus élevée. Cela est attendu au vu de la

méthode de calcul de cet indicateur, qui n'inclut que l'énergie nécessaire au pompage de l'eau souterraine et à la mise sous pression, qui n'est requise qu'avec l'irrigation goutte-à-goutte. Cela reflète également une certaine réalité. Au sein de la zone d'étude, la majeure partie des travaux se fait manuellement, seules quelques étapes étant mécanisées. L'hypothèse d'une différence de consommation négligeable entre les itinéraires culturaux tels qu'appliqués avec l'irrigation gravitaire et l'irrigation goutte-à-goutte semble donc tenable puisque, à part le désherbage une fois par an, ils sont très similaires. Une certaine prudence est toutefois de mise. Une augmentation de la consommation d'énergie par unité de surface est indéniable mais une augmentation simultanée des rendements par unité de surface pourrait atténuer cet effet si la consommation d'énergie est exprimée par rapport aux rendements, voire mener à une diminution de la consommation d'énergie par kg produit, comme ce fut par exemple observé dans certains vergers d'oliviers en Espagne (Pergola et al. 2013). Le passage au goutte-à-goutte implique donc une consommation d'énergie accrue par unité de surface mais l'absence de données relatives aux rendements appelle à une certaine prudence dans l'interprétation de cette observation.

Enfin, le nombre d'espèces cultivées est sensiblement plus faible au sein des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte. Cette observation n'est pas étonnante, et ce pour deux raisons. Tout d'abord, l'irrigation goutte-à-goutte s'accompagne souvent d'une spécialisation de l'exploitation. 85% des exploitations visitées pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte sont en effet spécialisées au sens où elles n'exportent qu'un seul type de culture tandis que ce n'est le cas que de 46% des exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire. Par ailleurs, lorsque des agrumes sont irrigués par voie gravitaire, les inter-rangs sont inévitablement alimentés en eau et nombre d'agriculteurs en profitent pour y cultiver des cultures destinées à leur propre usage (céréales, fourrage, courges…) voire même à la vente au souk (le marché local).

Sur le plan environnemental, les différences de performance entre l'irrigation goutte-à-goutte et l'irrigation gravitaire sont donc marquées à plusieurs niveaux. Une consommation énergétique nettement plus élevée et une diversité de cultures plus faible sont tout d'abord clairement observées dans les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte. En outre, le nombre de semaines de stress des cultures d'agrumes est également plus élevé pour les parcelles irriguées en goutte-à-goutte. Le déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte se traduit par contre par une pression moindre sur les nappes phréatiques. Finalement, la quantité d'eau prélevée dans la nappe

est plus faible lorsque l'irrigation gravitaire est pratiquée pour les petites exploitations spécialisées (<4.2 ha) ; dans tous les autres cas, elle est plus faible pour les exploitations pratiquant le goutte-à-goutte.
L'impact de la conversion à la technologie goutte-à-goutte sur la nappe, en termes de niveau est favorable. Les autres indicateurs de performance environnementale sont soit indifférents au type d'irrigation soit défavorables à l'irrigation goutte-à-goutte. L'impact environnemental est donc très mitigé et il convient de conclure que les principaux objectifs de la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte, du point de vue des agriculteurs, ne sont pas à chercher du côté du pilier environnemental.

L'aspect économique

Un seul des quatre indicateurs associés au pilier économique varie significativement selon le type d'irrigation (le nombre de sources de revenu). Les trois autres indicateurs, le revenu/ha, le rapport entre les entrées et les sorties financières et la pérennité du statut foncier, semblent parfaitement indépendant au type d'irrigation (tableau 27) et ont été discutés plus haut.
Le nombre de sources de revenus est sensiblement plus faible dans les exploitations irriguées au goutte-à-goutte (tableau 26). Cette observation n'a rien d'étonnant dans la mesure où un taux de spécialisation accru a déjà été mentionné pour ces exploitations, la proportion d'exploitations spécialisées étant, pour rappel, de 46% pour les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire contre 85% pour celles pratiquant le goutte-à-goutte.
L'impact de la technique d'irrigation sur la performance économique est donc faible. Aucun lien n'est établi entre la technique d'irrigation et le statut foncier. La technique d'irrigation ne semble pas non plus avoir d'impact sur le revenu ou la productivité économique des exploitations. Il semble par contre acquis que l'utilisation de la technique du goutte-à-goutte peut être associée à une diminution de la diversité des sources de revenus et un taux de spécialisation accru.

L'aspect social

Cinq indicateurs sont utilisés pour quantifier les performances sociales de l'irrigation. L'un d'entre eux, le pourcentage de terres irriguées, ne présente aucune différence selon le type d'irrigation. Un autre, le nombre de cultures exportées hors de l'exploitation, varie avec le type d'irrigation, ce nombre étant plus faible pour dans les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte, mais cette différence n'est pas significative. Les trois derniers diffèrent très significativement selon le type d'irrigation pratiqué par

l'exploitation (tableau 27). Il s'agit du travail quotidien, du niveau de formation et de l'indépendance par rapport aux contrats.

L'indicateur représentant le travail quotidien varie sur une échelle de 1 à 5, le niveau 1 représentant la situation dans laquelle le propriétaire travaille seul et effectue lui-même les travaux de l'exploitation tandis que le niveau 5 représente une situation où le propriétaire est accompagné d'un gérant pour la gestion de l'exploitation et où le travail quotidien est principalement effectué par des ouvriers. La valeur de cet indicateur varie sensiblement selon le type d'irrigation, avec une moyenne de 2 lorsque l'irrigation gravitaire est pratiquée contre une moyenne de 4 lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée (tableau 26). Cette observation peut paraitre surprenante dans la mesure où la technique d'irrigation goutte-à-goutte est réputée plus économe en main d'œuvre que l'irrigation gravitaire. Pour la comprendre, il est important de garder en tête que cet indicateur concerne principalement le travail régulier. Dans de petites exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire, du personnel supplémentaire est généralement engagé à la journée lors des épisodes d'irrigation mais le travail quotidien régulier est bel et bien effectué par le propriétaire ou le gestionnaire. L'indicateur n'inclut pas ce personnel supplémentaire engagé quelques jours par an et reflète donc autant une typologie d'exploitation qu'une demande de main d'œuvre structurelle liée au mode d'exploitation. Avec des tailles d'exploitation variant de 1.5 à 400 ha pour une moyenne de 43 ha, la typologie des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte est éminemment plus variée que les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire, dont la taille varie de 0.15 à 5.7 ha pour une moyenne de 3.4 ha. L'emploi de main d'œuvre structurelle est évidemment plus courant dans ces exploitations de grande taille et cela permet au propriétaire, voire au gestionnaire, d'occuper quotidiennement ses journées d'une manière très différente, qui requiert un travail « au champ » nettement moindre. Plusieurs auteurs ayant mené des études similaires rapportent d'ailleurs que la diminution de leur temps de travail est l'une des raisons les plus fréquemment mentionnées par les agriculteurs pour expliquer leur conversion à la technologie goutte-à-goutte (Foltz 2003; Bisconer 2010; Salhi et al. 2012). Cet indicateur reflète donc principalement cet état de fait.

Le niveau de formation moyen des gestionnaires des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte est lui-aussi significativement plus élevé que celui observé dans les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire (tableau 26). Tous les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire n'ont pour seule formation que leurs années d'expérience, le plus souvent dans l'exploitation

familiale, tandis que les exploitants des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte peuvent avoir des niveaux de formation plus élevés, allant d'une formation technique agricole inférieure à une formation universitaire. Aucun lien n'est par ailleurs observé entre la taille de l'exploitation et la formation du gestionnaire. Le lien de causalité entre ce niveau de formation et la technique d'irrigation doit toutefois être discuté : il semble en effet raisonnable d'affirmer que les agriculteurs adoptent l'irrigation goutte-à-goutte parce qu'ils ont un niveau de formation supérieur et non l'inverse. Plusieurs auteurs partagent d'ailleurs ce constat (Alcon et al. 2011; Salhi et al. 2012). Un niveau de formation élevé ne peut donc décemment être considéré comme une conséquence de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte bien que la corrélation entre ces deux paramètres soit significative.

Enfin, le sentiment d'indépendance par rapport aux contrats est bien plus élevé dans les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire (tableau 26). Dans la zone d'étude, les principales cultures vendues « par contrat » sont les agrumes destinés à l'exportation et les betteraves destinées à l'industrie sucrière. Les autres cultures et les agrumes destinés à la consommation locale sont souvent vendus directement ou indirectement par l'agriculteur au souk, le marché local. Le sentiment de dépendance par rapport au contrat concerne donc principalement la proportion de la production qui rentre dans la première catégorie. Cette proportion est généralement beaucoup plus importante chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte et le sentiment de dépendance par rapport aux contrats s'en trouve donc renforcé.

L'approche ESR montre toutefois que, pour l'irrigation gravitaire, le taux de spécialisation influence positivement cette indépendance, ce qui va à l'encontre de cette analyse. La valeur de ce coefficient, *a priori* surprenante, trouve son explication dans l'analyse de la typologie des exploitations spécialisées pratiquant l'irrigation gravitaire. Parmi les irrigations spécialisées pratiquant l'irrigation gravitaire, seule la moitié sont spécialisées dans la culture d'agrumes. L'autre moitié est spécialisée dans la culture de nèfle. Cette culture supporte mal le déplacement et est donc intégralement vendue au niveau local par des filières courtes. L'indépendance aux contrats pour les agriculteurs pratiquant ce type de culture est donc très faible malgré un taux de spécialisation élevé, ce qui explique la valeur positive du coefficient associé à la variable spécialisation donnée par l'approche *ESR* pour les exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire (alors qu'il est effectivement négatif (mais statistiquement dénué de sens) pour les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte) (tableau 28).

Sur le plan social, les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte se distinguent donc par une plus forte dépendance aux contrats, par une taille plus importante qui requiert une main d'œuvre accrue et par un niveau de formation des gestionnaires plus élevé. Le lien de causalité liant cette dernière observation au type d'irrigation doit toutefois être questionné. Dès lors, la seule observation favorable au passage au goutte-à-goutte serait la possibilité d'organiser le travail de manière différente, plus « industrielle », comme cela est le cas dans les exploitations de grande taille. Du point de vue du propriétaire, voire du gestionnaire, ce mode d'organisation requiert en effet un travail quotidien « au champ » nettement moindre.

Discussion

La quantification de ces indicateurs vise à identifier les objectifs poursuivis par les agriculteurs lors de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte. L'hypothèse posée était qu'une évaluation complète de la performance de l'irrigation dans des exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire et dans des exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte permettrait, par comparaison, d'identifier les aspects de la performance qui divergent sensiblement selon le type d'irrigation. L'objectif poursuivi par les agriculteurs lors de la mise en place de cette conversion en serait dès lors déduit.

L'analyse point par point des résultats de ce processus d'évaluation montre que les aspects environnementaux ne peuvent expliquer une telle conversion. Bien qu'une amélioration des performances environnementales, en particulier une diminution de la consommation d'eau, soit encore mentionnée comme un avantage indéniable de la technologie goutte-à-goutte par de nombreux auteurs et acteurs du monde de l'irrigation (Foltz 2003; Bisconer 2010), il est acquis que la performance environnementale telle qu'ici définie est en effet ici globalement plus faible dans les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte.

L'impact de la technique d'irrigation sur la performance économique s'avère quant à lui assez faible et même nul sur le plan financier. Les données nécessaires au calcul des deux indicateurs financiers sont toutefois particulièrement délicates à collecter et une incertitude importante doit donc leur être associée. Des conclusions tranchées ne peuvent donc être tirées. Ajoutons que, ni dans les chiffres ici présentés ni dans la littérature, rien ne permet d'affirmer que la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte s'accompagne effectivement d'un effet bénéfique. Si cet objectif est poursuivi par les agriculteurs lorsque la conversion est décidée, il est

probable que les résultats escomptés ne soient pas rencontrés par tous et que, de ce point de vue, cette conversion soit un échec pour certains agriculteurs.
Plusieurs auteurs étaient pourtant initialement enthousiastes. En 2003, Merry vante ainsi la rentabilité de l'irrigation goutte-à-goutte tandis que, en 2008, Khan et al. sont déjà plus nuancés et considèrent quant à eux que cette technologie est « le moyen le plus rentable de réduire la consommation d'eau agricole ». Comme expliqué plus haut, les études les plus récentes divergent toutefois. Nos résultats vont dans ce sens en étant eux-aussi pour le moins nuancés.
Sur le plan social, seule la possibilité d'organiser le travail de manière différente a été identifiée comme potentiellement bénéfique pour l'agriculteur. Les témoignages récoltés dans la zone d'étude confirment cette observation, de même que plusieurs études similaires réalisées dans d'autres périmètres irrigués en Tunisie et en Algérie (Foltz 2003; Salhi et al. 2012). Dans la zone d'étude, l'irrigation gravitaire est en effet associée à une opération lourde à mettre en place et à la nécessité de faire appel à des travailleurs journaliers qui demandent un taux d'encadrement élevé. A l'inverse, l'irrigation goutte-à-goutte permet de s'affranchir de ces contraintes, soit en se passant de cette main d'œuvre journalière pour les plus petites exploitations soit en la remplaçant par des travailleurs engagés à l'année, dont l'encadrement est beaucoup plus aisé, pour les exploitations de taille plus importante.
Le processus d'évaluation ici implémenté permet donc de mettre en évidence un objectif poursuivi par les agriculteurs adoptant la technologie goutte-à-goutte, lié aux conditions de travail.
Dans la littérature, les raisons de la non-adoption de la technologie goutte-à-goutte mentionnées sont essentiellement d'ordre pratique, laissant sous-entendre que les avantages d'une adoption seraient acquis. Ainsi, en Chine, Burnham et al. (2015) identifient 5 raisons principales pour lesquelles les petits agriculteurs abandonnent l'idée d'adopter la technologie goutte-à-goutte : le manque de stabilité sociale, un ordre de priorité favorisant d'autres stratégies de subsistance, une méconnaissance de la technique et de son fonctionnement, les risques associés aux marchés et les problèmes fonciers. Les autres raisons les plus fréquemment mentionnées ont trait aux contraintes budgétaires, à l'accès au crédit et au manque de temps (Foltz 2003; Alcon et al. 2011; Salhi et al. 2012). Un seul de ces auteurs mentionne le manque de pertinence de cette technologie au regard des objectifs poursuivis, argument évoqué par 6% des agriculteurs rencontrés dans le cadre de son étude (Foltz 2003).

Au regard de nos résultats, il apparait pourtant que les avantages de cette conversion ne sont pas si évidents qu'initialement escomptés. Sur le plan environnemental, malgré les éventuels espoirs d'économie d'eau, nos conclusions plaident en défaveur de cette conversion. Sur le plan économique, nos résultats sont eux-aussi pour le moins nuancés. Reste donc la question de la performance sociale.

A cet égard, les aspects liés à l'organisation du travail semblent primordiaux. Les observations de notre étude et les conclusions de nombreux auteurs convergent : un des principaux attraits de la technologie goutte-à-goutte réside dans la possibilité qu'elle offre d'organiser le travail quotidien de manière très différente. La préséance des aspects sociaux, au sens large, est par ailleurs soulignée par de nombreux auteurs au travers des corrélations observées entre l'adoption de la technologie goutte-à-goutte et le niveau de formation, le contexte social ou l'information disponible (Foltz 2003; Alcon et al. 2011; Salhi et al. 2012). Plus subtiles encore sont peut-être les raisons de l'adoption de cette technologie mises en évidence par Kulecho and Weatherhead (2005) au Kenya, qui évoquent le « contexte culturel défavorable » pour expliquer l'abandon de la technologie par plusieurs agriculteurs l'ayant initialement adoptée, ou par Wanvoeke et al. (2016) au Burkina Faso. D'après leur interprétation, l'adoption de cette technologie n'est en fait qu'un élément qui s'intègre dans une stratégie plus globale dont l'objectif est de tirer le maximum de profit de projets de développement. Là, le principal intérêt de l'adoption réside avant tout dans les avantages latéraux qui en découlent, comme l'accès au crédit favorisé, le prestige social ou l'opportunité que cela représente de créer de nouvelles alliances.

La relation, observée dans nos résultats, entre le niveau de dépendance aux contrats et l'adoption de la technologie goutte-à-goutte pourrait être analysée sous cet angle. L'adoption de la technologie goutte-à-goutte serait ainsi encouragée par une volonté de modernisation au sens large, souhaitée par les sociétés d'exportation. L'adoption de la technologie goutte-à-goutte serait alors vue comme un moyen de modernisation, comme cela est souligné par plusieurs auteurs (Willardson et al. 1994; Olmstead 2010; Boelens and Vos 2012; Lopez-Gunn et al. 2012; van Halsema and Vincent 2012; van der Kooij et al. 2013; Berbel and Mateos 2014; Venot et al. 2014). Cette affirmation est toutefois purement spéculative et, si elle était confirmée, serait profondément inconsciente. En effet, ni dans le discours des agriculteurs ni dans celui d'aucun des acteurs du monde de l'irrigation rencontrés la moindre mention n'a été faite d'une quelconque pression en faveur de l'irrigation goutte-à-goutte de la part des sociétés exportatrices ou

d'une quelconque volonté de se plier à leur supposé modèle de la part des agriculteurs.
A l'exception de la question de l'organisation du travail, ces aspects sont très rarement évoqués par les agriculteurs pour motiver leur conversion à la technologie goutte-à-goutte. L'analyse approfondie de la performance de l'irrigation ici présentée et des diverses études mentionnées permet toutefois de démontrer que ce sont bel et bien ces questions sociales qui déterminent avant tout, et peut-être inconsciemment, la volonté des agriculteurs d'adopter cette technologie. Si la conversion à cette technologie est encouragée par nombre de scientifiques et d'acteurs institutionnels en raison de son potentiel environnemental, voire économique, les objectifs effectivement poursuivis par les agriculteurs sont donc d'un tout autre ordre. Cet état de fait pourrait, en partie, expliquer l'échec de cette conversion à améliorer les performances environnementales de l'irrigation.

Conclusion

La mise en place du processus d'évaluation des performances ici présenté vise à identifier les objectifs effectivement poursuivis par l'agriculteur lors de la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans la plaine des Triffa au Maroc. Pour ce faire, une liste de 18 indicateurs a été dressée et il convient maintenant de les quantifier. Ces indicateurs sont associés au pilier environnemental (9 indicateurs), au pilier économique (4 indicateurs) ou au pilier social (5 indicateurs). La valeur de ces indicateurs chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire sera utilisée comme valeur de référence. Elle sera comparée à la valeur de ces indicateurs chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte. Les objectifs effectivement poursuivis par les agriculteurs lors de la mise en œuvre de cette conversion pourront ainsi être identifiés.
Les données nécessaires sont disponibles pour un échantillon de 25 agriculteurs. Ces données ont été collectées au cours d'entretiens réalisés en 2012 et en 2013. Parmi ces 25 exploitations, 13 pratiquent l'irrigation gravitaire et 12 l'irrigation goutte-à-goutte. Les indicateurs de performances sont donc quantifiés pour ces 25 exploitations. Diverses analyses statistiques sont alors implémentées afin de finement appréhender la variabilité de ces indicateurs, chez les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire comme chez ceux pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte.
Les valeurs de 14 des 18 indicateurs sont pertinentes à analyser, les quatre autres n'apportant aucune information. Sur ces 14 indicateurs, 6 sont indépendants au type d'irrigation. Au final, 8 indicateurs présentent donc des

différences par rapport au type d'irrigation et peuvent apporter des éléments de réponse aux objectifs de ce processus d'évaluation.

Sur le plan environnemental, une consommation énergétique nettement plus élevée et une diversité de cultures plus faible sont observées dans les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte. Le nombre de semaines de stress des cultures d'agrumes est également plus élevé pour les parcelles irriguées en goutte-à-goutte. A grande échelle, le déploiement de la technologie goutte-à-goutte induit par contre une diminution des pressions sur les nappes phréatiques. L'impact environnemental de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte est donc mitigé et il est difficile de conclure que les objectifs poursuivis par les agriculteurs pratiquant cette conversion sont à chercher de ce côté.

L'impact de la technique d'irrigation sur la performance économique est faible. Aucun lien n'est établi entre la technique d'irrigation et le statut foncier. La technique d'irrigation ne semble pas non plus avoir d'impact sur le revenu ou la productivité économique des exploitations. Il semble par contre acquis que l'utilisation de la technique du goutte-à-goutte peut être associée à une diminution de la diversité des sources de revenus et un taux de spécialisation accru. Sur le plan social, les exploitations pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte se distinguent par une plus forte dépendance aux contrats, par une taille plus importante qui requiert une main d'œuvre accrue et par un niveau de formation des gestionnaires plus élevé. Le lien de causalité liant cette dernière observation au type d'irrigation doit toutefois être questionné. La seule observation favorable au passage au goutte-à-goutte serait dès lors la possibilité d'organiser le travail de manière différente, plus « industrielle ».

Le processus d'évaluation implémenté permet donc de mettre en évidence un objectif poursuivi par les agriculteurs adoptant la technologie goutte-à-goutte, celui-ci étant lié aux conditions de travail. Bien que rarement explicitées par les agriculteurs, il apparait donc que ce sont bel et bien les questions sociales qui déterminent avant tout la volonté des agriculteurs d'adopter cette technologie. Cet état de fait pourrait, en partie, expliquer l'échec de cette conversion à améliorer les performances environnementales de l'irrigation.

Chapitre 5 – De la question des données

Lors des différentes étapes mises en place pour atteindre ces conclusions, les problèmes liés aux données, principalement à leur accès ou à leur qualité, furent légions. Des mentions récurrentes de cette problématique parsèment d'ailleurs l'ensemble du document. Il semble donc ici approprié de faire le point sur la disponibilité et la qualité des données dans la zone d'étude en particulier et sur le traitement spécifique qui a été réservé à cet aspect dans ce travail.

Nombre d'auteurs soulignent que les données liées à l'irrigation sont souvent inexistantes, inaccessibles ou de piètre qualité et donc peu fiables (Sam-Amoah and Gowing 2001; Bastiaanssen et al. 2007; Hamid et al. 2011; Kharrou et al. 2013). De nombreuses études ont d'ailleurs échoué à atteindre les objectifs fixés à cause de ce problème de données (Smith 1990). Au Maroc spécifiquement, cette question fait débat, en particulier pour les acteurs du monde de la recherche (Moumen et al. 2015). Le périmètre irrigué de la plaine des Triffa ne fait pas exception à la règle et cette question y est effectivement délicate.

La mise en place d'une étude telle que celle ici présentée requiert l'accès à un grand nombre de données. L'étendue (4000 ha) et la variété (750 exploitations dont la taille varie de quelques ares à plusieurs centaines d'hectares) du CMV103 rendent en effet une collecte systématique de toutes ces données sur le terrain inenvisageable, principalement pour des questions de moyens financiers et de temps imparti. Le besoin de données historiques renforce par ailleurs cet état de fait. Le recours à la modélisation des processus à l'échelle de la zone d'étude est donc indispensable mais requiert lui-aussi un certain nombre de données.

5.1 - Etendue du problème

Le problème des données dans la plaine des Triffa peut être synthétisé en trois points : peu de données existent, l'accès aux données existantes est compliqué et la qualité des données accessibles est discutable.

Existence des données

Peu de données sont disponibles pour la plaine des Triffa, et ce pour deux raisons. Premièrement, la collecte de bon nombre de données est très difficile, soit en raison de l'ampleur de la tâche soit à cause de la difficulté technique de réaliser ces mesures. 750 agriculteurs exploitent des terres dans le CMV103, qui représente un dixième de la superficie totale de la plaine et 6% de l'ensemble des périmètres gérés par l'ORMVAM. La collecte de données systématique auprès de chaque agriculteur est donc fastidieuse et limitée aux données nécessaires. A notre connaissance, cela se limite à un recensement effectué chaque année, qui collecte les différentes cultures pratiquées et les superficies occupées par ces cultures, à la présence ou non d'un accès à l'eau de la nappe et aux apports d'eau depuis le barrage, et ce pour chaque agriculteur.

Deuxièmement, lorsque des moyens ont été mis en œuvre pour permettre une collecte aisée et efficace des données, la maintenance et le suivi de ces réseaux de mesure ne sont pas toujours réalisés adéquatement. Le cas du réseau de suivi piézométrique est un très bon exemple. Lors du développement des grandes infrastructures hydrauliques dans les années 1960, un réseau de suivi piézométrique de la nappe de la plaine des Triffa fut mis en place. Ainsi, en 1971, 30 piézomètres étaient fonctionnels et le niveau de la nappe y était relevé tous les 2 mois. Cette situation perdura jusqu'à l'aube des années 2000. Pour la plupart de ces piézomètres, les mesures disponibles s'arrêtent en effet subitement à une date allant de septembre 1999 à septembre 2000. A partir de ce moment, quelques mesures sporadiques restent disponibles pour ces piézomètres. Seuls quatre d'entre eux, situés à des endroits stratégiques de la plaine, sont aujourd'hui encore régulièrement relevés.

Malgré ces difficultés, plusieurs données existent (tableau 30). Ces données peuvent être des données génériques dont l'accès n'est pas restreint, des données anciennes (« données historiques ») pouvant aujourd'hui être considérées comme faisant partie du domaine public, des données scientifiques appartenant à l'une ou l'autre institution de recherche ou des

données appartenant à des agences gouvernementales marocaines, principalement l'ORMVAM, en charge de la gestion des périmètres irrigués de la basse Moulouya, et l'ABHM, en charge de la gestion des ressources en eau dans le bassin versant de la Moulouya.

Accès aux données

La deuxième source de difficulté réside dans l'accès aux données existantes. Si les données génériques et historiques peuvent être diffusées et utilisées sans contrainte, l'accès aux données appartenant à la communauté académique ou aux agences gouvernementales est par contre beaucoup plus compliqué. Plusieurs raisons peuvent être évoquées pour expliquer ces difficultés d'accès à des données pourtant bel et bien collectées.

Tout d'abord, aucun recensement clair des données collectées au sein de la zone d'étude n'existe, ni de manière centralisée ni même au sein des agences qui collectent ces données, encore moins au sein de la communauté académique. Ceci s'explique par le fonctionnement de ces institutions, organisées en services ou en individualités qui gèrent chacun leurs propres données. L'absence de centralisation, le manque de coordination entre les différents services, employés, chercheurs et la dispersion de ces données rendent leur accès effectif extrêmement fastidieux.

La gestion des données collectées, loin d'être optimale, entrave également leur circulation. L'encodage de données récoltées est fréquemment oublié, donnant lieu à des séries chronologiques lacunaires par exemple, alors que les données ont bel et bien été collectées sur le terrain. Plusieurs jeux de données collectés ne sont par ailleurs jamais numérisés. Il en va de même pour de nombreuses cartes, plans, etc. Cela peut avoir lieu par manque de moyen (par exemple, l'administration du CMV103 ne disposait, en 2012, d'aucun ordinateur) ou de volonté. Enfin, l'archivage des données, qu'il s'agisse de versions « papier » ou de versions numérisées, est fréquemment déficient et les données peuvent ainsi dans les faits être considérées comme perdues. Cette dernière remarque est toutefois loin d'être spécifique à la zone d'étude ou au monde de l'irrigation.

Tableau 30 : Synthèse des principales données existantes et potentiellement utilisables dans le cadre d'études liées à l'irrigation dans le périmètre de la plaine des Triffa (Maroc Oriental). La mention « Données historiques » fait référence à des données anciennes pouvant aujourd'hui être considérées comme faisant partie du domaine public et la mention « Données génériques » fait référence à des données dont le propriétaire est clairement identifié mais dont la diffusion et l'utilisation ne sont pas limitées.

Fournisseur de données	Catégorie	Exemples de données (échelle)
ORMVAM	Administration	Statut foncier
		Demandes de subsides
		Parcellaire agricole
	Météorologie	Pluviométrie
		Températures
	Agriculture	Cultures pratiquées
		Superficies cultivées
	Irrigation	Volumes distribués (exploitation)
		Montants facturés
ABHM	Météorologie	Pluviométrie
	Hydrologie	Débits des oueds
	Piézométrie	Niveaux piézométriques
	Irrigation	Volumes distribués (barrage)
Communauté académique	Pédologie	Description de profils
		Analyses pédologiques
		Carte des sols
	Piézométrie	Profils ERT
		Cartographie piézométrique
	Géologie	Coupes géologiques
		Failles
	Hydrologie	Bilans hydriques (pédon)
		Mesures de flux (pédon)
	Hydrogéologie	Analyse des eaux souterraines
		Bilans hydrique
Données historiques	Pédologie	Descriptions de profils
		Analyses pédologiques
		Granulométrie
	Géologie	Coupes géologiques
		Bilans hydriques (nappe)
Données génériques	Topographie	Cartes topographiques
	Télédétection	Images satellites (longueurs d'onde variées)
		Modèle Numérique de Terrain
		Données météorologiques
		Gravité

Enfin, l'absence quasi systématique de règlements encadrant la diffusion et l'utilisation des données, qu'il s'agisse de règlements officiels ou de règles informelles, rend les démarches d'acquisition de données particulièrement floues et exploratoires. Ces démarches s'effectuent généralement directement auprès des dépositaires physiques des données et le succès de ces démarches dépend alors de facteurs humains bien plus que de facteurs officiels. Même en cas de signature d'accords officiels de collaboration et d'échange de données, comme il y en eut plusieurs dans le cadre de ce travail, les réticences personnelles peuvent faire capoter ces démarches. Pour terminer, une fois l'accord du dépositaire obtenu, l'absence de protocole de transfert de données et le manque de suivi des demandes peuvent encore ralentir, voire anéantir, le processus.
Les protocoles d'accès aux données existantes ne sont donc en aucun cas standardisés. Une fois l'existence de la donnée vérifiée, l'accord officiel obtenu et le dépositaire identifié, l'accès définitif à la donnée requiert donc encore une certaine bonne volonté, du tact et du doigté, un peu de chance et beaucoup de patience.

Qualité des données

Enfin, la troisième source de difficulté se trouve dans la qualité des données disponibles. Lors de la diffusion de données, en particulier des données gérées par les agences gouvernementales, les protocoles de mesure ne sont que rarement disponibles, ce qui peut rendre les données difficiles à utiliser ou à interpréter. Ces données sont en outre très souvent mesurées et encodées manuellement puis numérisées. Ces nombreuses manipulations peuvent entrainer des erreurs difficilement détectables ou quantifiables. Le manque de maintenance des instruments de mesure peut également entrainer des biais non identifiés.
L'utilisation de mesures anciennes peut également poser des problèmes de qualité, et ce pour deux raisons. Tout d'abord, les techniques et les protocoles de mesure peuvent avoir évolué. Lorsqu'il s'agit de données scientifiques, ces protocoles sont généralement bien détaillés mais une correction *a posteriori* est rarement possible. La comparaison avec des données récentes est alors délicate et une attention particulière doit alors être portée à l'interprétation des résultats tirés de ces données. Par ailleurs, le manque d'actualisation de ces données, alors même qu'une évolution profonde et rapide de la zone d'étude est observée, les rend parfois délicates ou impossibles à utiliser.

Le manque de données, l'accès difficile aux données existantes et la qualité variable des données disponibles, aspects fréquemment mentionnés dans les travaux portant sur les systèmes d'irrigation, sont donc bien une réalité dans la zone d'étude. La prise en compte explicite de cette problématique dans la méthodologie et le traitement des données est donc une nécessité sous peine de voir la méthodologie prévue impossible à implémenter ou de voir les résultats obtenus invalidés.

5.2 - Solutions mises en place

Le traitement de cette problématique dans notre travail prend plusieurs formes, que nous allons ici détailler. L'objectif de cette présentation est double : il s'agit d'une part de montrer à quel point cette question est contraignante et combien son traitement conditionne la réussite des études liées à l'irrigation et, d'autre part, de proposer des solutions qui permettent, dans une certaine mesure, d'appréhender efficacement cette problématique.

Existence des données

Actant du faible nombre de données existantes, le travail fut d'emblée balisé afin de permettre d'éventuelles collectes systématiques ou campagnes de mesures représentatives. Ainsi, le projet original ambitionnait de travailler sur l'ensemble du périmètre irrigué de la plaine des Triffa, soit une zone d'environ 40000 ha comprenant plusieurs milliers d'exploitations. Très vite cependant, la question de l'existence des données apparut et la collecte *in situ* de certaines données dut être envisagée. La zone d'étude fut alors limitée au CMV103, qui représente un dixième de la surface de la zone initialement considérée, afin de rendre possible une telle collecte.

Par ailleurs, la méthodologie implémentée dans le cadre de ce travail l'a été sur base des données existantes. Le modèle de bilan hydrique (chapitre 3.3), par exemple, a été développé en quatre étapes. La première étape a consisté à réaliser un inventaire le plus complet possible des données disponibles. Dans un deuxième temps, un premier modèle fut conçu spécifiquement sur cette base : ce modèle ne nécessitait que des données déjà en notre possession. Une analyse de sensibilité de ce modèle fut ensuite réalisée pour identifier les paramètres les plus sensibles et les principales sources d'incertitude du modèle. Un certain nombre de données critiques fut alors identifié et un traitement particulier leur fut réservé, ce qui constitue la troisième étape de la démarche. Lorsque cela était possible, les données furent obtenues auprès des administrations. Il s'agit des données relatives aux superficies cultivées, aux cultures pratiquées et au type d'irrigation. Ces données furent ensuite vérifiées sur le terrain au cours de deux campagnes de mesures auprès d'un échantillon représentatif d'agriculteurs. Au cours de cette même campagne, d'autres données furent directement collectées. Il s'agit des données relatives à l'irrigation et au pompage. Les données critiques ainsi collectées, la quatrième étape a consisté à adapter la structure du modèle et à allonger la

période de simulation, constituant ainsi la version définitive du modèle telle que présentée dans ce travail.
La procédure ainsi implémentée permet de maximiser l'utilisation des données disponibles grâce à une conception spécifique du modèle. Elle permet également de minimiser les couts de collecte de nouvelles données grâce à l'identification préliminaire des données les plus pertinentes à collecter. Le modèle ainsi conçu a permis de réaliser plusieurs observations et analyses qui eurent été impossibles à réaliser à si faible coût sans cette prise en compte explicite de la problématique des données.
Plus loin dans le travail (chapitre 4), la sélection d'indicateurs de performance intègre elle aussi explicitement la question de l'existence des données. L'un des critères les plus courants pour évaluer la pertinence d'un indicateur est qu'il puisse être quantifié (Bell and Morse 2003; Reed et al. 2005). L'inadéquation d'un indicateur aux données disponibles est donc un critère d'élimination répandu (Fekete and Stakhiv 2014) qui fut ici appliqué.

Accès aux données

Le problème d'accès aux données existantes est peut-être l'aspect le plus complexe et le plus profond de la problématique des données. Il fut donc appréhendé d'une toute autre manière. Trois types de démarches furent développés en parallèle.
Tout d'abord, de nombreux contacts personnels, informels ou officiels, furent initiés. Les facteurs humains étant déterminants dans la possibilité d'accès aux données, il était en effet important d'impliquer les dépositaires des données dans le travail le plus tôt possible. Dès le début du travail, les objectifs et la méthodologie prévus leur furent présentés et leurs conseils et commentaires récoltés. Par la suite, le soutien de ces acteurs, entretenu par des contacts réguliers, s'est avéré indispensable à l'acquisition des données existantes.
Ensuite, la signature de conventions de collaboration entre les agences gouvernementales, en particulier l'ORMVAM, et les instances académiques belges et marocaines impliquées dans le projet de recherche s'est avérée indispensable afin de s'assurer du soutien officiel de ces instances. Ces conventions de collaboration se sont inscrites dans un contexte plus large que la seule présente étude. L'existence de plusieurs projets de recherche, toujours en cours, traitant de la gestion des ressources en eau dans la province du Maroc Oriental a en effet permis d'atteindre une « masse critique » qui a attiré l'attention des autorités marocaines et a permis de mettre en place ces différentes conventions. Le texte de ces conventions

mentionne explicitement que les partenaires s'engagent à se faciliter l'accès aux bases de données disponibles. L'existence de ces conventions répond à l'absence de règlement encadrant la diffusion des données et s'est donc avérée nécessaire pour prétendre à un accès aux données officielles. L'expérience a par la suite montré qu'elle n'était par contre pas suffisante pour garantir un accès effectif à ces données.

Enfin, une base de données collaborative fut mise en place. Cette base de données est physiquement constituée d'un serveur de stockage hébergé dans les locaux de l'université d'Oujda (UMP) et d'une interface d'utilisation accessible en ligne. Nommée Observatoire de l'Eau et de l'Environnement de l'Oriental (OEEO), elle ambitionne de rassembler les données récoltées aussi bien par les acteurs scientifiques que par les acteurs gouvernementaux dans une seule base de données, accessible en permanence par ces différents acteurs. Dans sa phase initiale de développement, les principaux acteurs de cette base de données devraient être les partenaires signataires des conventions de collaboration, soit l'ABHM, l'ORMVAM, les chercheurs de deux universités marocaines (l'UMP de Oujda et l'IAV de Rabat) et de deux universités belges impliquées dans ces projets de recherche (l'UCL et l'ULg-GemblouxABT). A terme, l'ensemble des acteurs impliqués dans la gestion de l'eau dans la province du Maroc Oriental y auraient accès.

Actuellement, cette base de données est administrée par deux personnes représentant les universités marocaines d'une part et belges d'autre part. Son utilisation est conditionnée à la signature d'une charte qui garantit que les droits des propriétaires et les conditions de diffusion et d'utilisation des données qui y sont déposées seront respectés. De cette manière, tous les utilisateurs pourraient à la fois y mettre à disposition leurs propres données mais aussi accéder aux données des différents partenaires.

Le succès de cette base de données est cependant relatif. Malgré l'intérêt affiché lors de sa présentation, le nombre d'utilisateurs effectifs de cette base de données est assez restreint et se limite principalement aux partenaires universitaires du projet, l'activité des partenaires gouvernementaux y étant à peu près nulle. Au niveau de l'alimentation en données, les réactions sont très variables. Certains partenaires gouvernementaux n'ont jamais mis en ligne la moindre donnée alors que d'autres ont donné accès à un grand nombre de données de qualité. Les partenaires universitaires diffusent quant à eux assez largement les documents publiés, articles, thèses et rapports, en lien avec la thématique mais la mise à disposition des données en tant que telle reste assez rare.

L'ensemble des démarches entreprises en vue de faciliter l'accès aux données existantes a donc eu un succès mitigé. De nombreuses données difficilement accessibles ont pu être acquises et utilisées. Une dynamique de collaboration a été initiée entre les différents acteurs impliqués dans la gestion des ressources en eau et des outils ont été créés pour faciliter cette collaboration. A l'inverse, de nombreuses données restent inaccessibles. La communication avec certains acteurs reste très difficile et la dynamique de collaboration initiée reste très fragile. La mise à disposition des données reste délicate, et ce de la part de tous les acteurs impliqués. Le succès des démarches entreprises est donc incontestable mais l'ampleur de ce succès est toutefois bien moindre qu'espéré.

Qualité des données

La qualité des données disponibles est donc incertaine. Comme expliqué plus haut, cette incertitude est par ailleurs très difficile à quantifier avec précision et est donc très difficile à réduire. Après une analyse critique des données reçues, analyse passant par l'étude de la cohérence des données, la comparaison d'éventuelles données provenant de différentes sources entre elles, etc., le principal traitement réalisé consiste à quantifier l'impact de cette incertitude sur les résultats finaux. Pour ce faire, plusieurs démarches ont été entreprises, qui varient en fonction des possibilités offertes par la méthodologie mise en place.

Calcul de l'efficience de l'irrigation η

Le calcul de l'*efficience de l'irrigation* η est mathématiquement assez simple. Une approche analytique est donc possible afin de quantifier la fiabilité des résultats au regard de l'incertitude des données utilisées. Les hypothèses requises pour l'implémentation d'une analyse du premier ordre sont en effet réunies et celle-ci peut donc être développée.

L'analyse de premier ordre peut être résumée comme suit. Soient Δx_1, Δx_2 ... Δx_n les incertitudes associées aux données d'entrée x_1, x_2 ... x_n indépendantes et aléatoires, l'équation 22 peut être utilisée pour évaluer la propagation de ces incertitudes à travers toute fonction $y(x_1, x_2 \ldots x_n)$ (Taylor 1997).

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\Delta x_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\Delta x_n\right)^2} \qquad \textbf{(22)}$$

avec Δx_n l'incertitude associée à l'entrée x_n et Δy l'incertitude sur le résultat de l'équation y. Cette expression générale est appliquée à chaque étape de la procédure de calcul de l'*efficience de l'irrigation* (chapitre 3.1) et l'écart type final est alors obtenu. Cette analyse de la propagation de l'incertitude permet donc de quantifier l'impact de l'incertitude des données d'entrée sur les résultats finaux.

L'intervalle de confiance fut estimé pour chaque donnée d'entrée, à savoir les données météorologiques, les données relatives au sol, les données agronomiques et l'application d'eau d'irrigation par les agriculteurs. L'incertitude associée aux données météorologiques est estimée à 10% pour les précipitations, à 2°C pour la température et à 5% pour le rayonnement extra-terrestre. Les incertitudes associées aux facteurs K_{cb} et p utilisés pour le calcul de l'évapotranspiration (Allen et al. 1998) sont estimées à 20%. Les incertitudes associées aux pourcentages des classes texturales du sol vont de 19 à 37% selon le type de sol et la profondeur. Un biais supplémentaire de 25% est ajouté car les méthodes d'analyse utilisées en 1956 pour déterminer la texture du sol sont aujourd'hui considérées comme inappropriées. Cela amène parfois l'incertitude sur le pourcentage des classes texturales à des valeurs supérieures à 100%. L'incertitude sur la teneur en carbone organique s'échelonne de 0.17 à 0.28%, qui découlent d'une incertitude relative arbitrairement estimée à 30% sur les mesures de matière organique.

Enfin, des données précises sur les quantités d'eau d'irrigation appliquées sont souvent impossibles à obtenir. Le tableau 31 présente les estimations faites de l'incertitude associée aux quantités d'eau appliquées pour chaque parcelle étudiée (ΔI). Cette incertitude est importante et variable, ΔI s'échelonnant de 10 à 75%. Malgré ces valeurs élevées, l'incertitude associée aux valeurs d'*efficience de l'irrigation* calculées ($\Delta\eta$) reste acceptable. Cette incertitude est toutefois donnée à titre indicatif. Les dernières modifications apportées au modèle de calcul de l'efficience n'ont en effet pas été prises en compte dans son calcul et cette incertitude est donc quantifiée sur base d'une précédente version du modèle de calcul de l'efficience.

$\Delta\eta$ n'intègre, par rapport à l'irrigation, que l'incertitude associée aux quantités d'eau appliquées ΔI et l'incertitude relative au moment d'application n'est donc pas prise en compte. Cependant, le calcul de l'efficience η est réalisé sur base d'un bilan hydrique intégré dans le temps et est donc peu sensible au moment précis de l'application d'eau. La relation entre la quantité annuelle d'eau d'irrigation appliquée et l'*efficience* η calculée (figure 42) montre en effet une bonne corrélation entre ces valeurs.

La quantité totale d'eau d'irrigation est un indicateur qui n'inclut pas le moment précis de l'irrigation et cette bonne corrélation indique donc que l'*efficience de l'irrigation* η est principalement déterminée par la quantité d'eau d'irrigation appliquée et que le moment précis d'application est généralement adéquat.

Tableau 31 : ***Efficience de l'irrigation*** η **calculée à l'échelle parcellaire. Les incertitudes associées à ces valeurs (**$\Delta\eta$**) sont données à titre indicatif car elles ont été calculées sur une version différente du modèle de calcul de l'efficience. Les valeurs entre parenthèses dans les première et troisième colonnes sont les incertitudes associées aux quantités d'eau appliquées (**ΔI**).**

Irrigation gravitaire		**Irrigation goutte-à-goutte**	
Parcelle (ΔI)	η ($\pm \Delta\eta$) [%]	Parcelle (ΔI)	η ($\pm \Delta\eta$) [%]
2-1 (30%)	71.6 (± 5.3)	1-1 (10%)	99.7 (± <0.1)
2-2 (30%)	71.6 (± 5.2)	1-2 (10%)	99.7 (± <0.1)
2-3 (30%)	80.1 (± 5.2)	1-3 (10%)	99.7 (± <0.1)
6-1 (50%)	38.8 (± 7.5)	1-4 (10%)	99.7 (± <0.1)
6-2 (50%)	99.3 (± <0.1)	1-5 (10%)	99.7 (± <0.1)
6-3 (50%)	40.2 (± 7.8)	1-6 (10%)	99.7 (± <0.1)
7-1 (50%)	16.9 (± 8.4)	1-7 (10%)	99.7 (± <0.1)
8-1 (20%)	99.5 (± <0.1)	1-8 (10%)	99.7 (± <0.1)
9-1 (20%)	48.3 (± 3.4)	3-1 (30%)	24.8 (± 10.5)
10-1 (30%)	98.7 (± 0.4)	3-2 (30%)	24.8 (± 10.5)
12-1 (40%)	90.6 (± 1.4)	4-1 (20%)	99.3 (± 2.1)
12-2 (40%)	89.3 (± 1.5)	4-2 (20%)	82.5 (± 1.9)
12-3 (40%)	53.2 (± 1.4)	4-3 (20%)	82.5 (± 1.9)
13-1 (30%)	53.6 (± 5.7)	4-5 (20%)	82.5 (± 1.9)
13-2 (30%)	18.9 (± 9.5)	11-1 (20%)	14.2 (± 6.1)
14-1 (30%)	85.0 (± 4.7)	11-2 (20%)	12.5 (± 6.1)
14-2 (30%)	62.3 (± 5.1)	17-1 (20%)	88.9 (± 1.5)
14-3 (30%)	99.6 (± <0.1)	17-2 (20%)	88.9 (± 1.5)
15-1 (50%)	33.1 (± 9.7)	18-1 (75%)	28.0 (± 12.6)
24-1 (20%)	20.6 (± 4.6)	20-1 (20%)	27.2 (± 7.4)
24-2 (60%)	30.7 (± 17.8)	21-1 (20%)	21.3 (± 7.9)
24-3 (60%)	31.1 (± 9.4)	21-2 (20%)	25.2 (± 7.9)
25-1 (60%)	48.3 (± 8.3)	22-1 (20%)	14.3 (± 4.7)
25-2 (60%)	56.9 (± 6.7)	23-1 (20%)	99.9 (± 1.1)
25-3 (60%)	52.2 (± 6.7)	23-2 (20%)	20.7 (± 5.6)
25-4 (40%)	97.6 (± <0.1)	23-3 (20%)	99.8 (± 1.0)
26-1 (40%)	99.8 (± 0.9)	27-1 (40%)	42.1 (± 7.9)
26-2 (40%)	72.2 (± 0.2)	28-1 (40%)	59.5 (± 5.1)

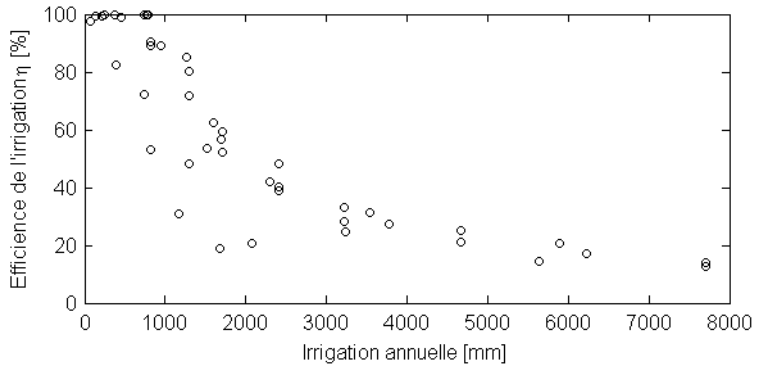


Figure 42 : Relation entre la quantité d'eau d'irrigation appliquée [mm/an] et l'*efficience de l'irrigation η* [%].

Calcul des pressions sur les ressources en eau

Le modèle de bilan hydrique de la zone d'étude (chapitre 3.3) est trop complexe pour pouvoir lui appliquer l'analyse de premier ordre décrite ci-dessus. La méthode mise en place pour quantifier l'impact de la qualité des données d'entrée sur les résultats du modèle diffère donc de celle implémentée pour le calcul de l'*efficience*.

La méthode ici développée consiste à injecter dans le modèle des données d'entrée modifiées de leur incertitude autour de leur valeur mesurée et à comparer les résultats alors obtenus avec les résultats de référence, définis comme les résultats obtenus avec les valeurs mesurées (méthode de Monte-Carlo). Pour des raisons pratiques, une analyse plus fine est très compliquée à mettre en place.

La valeur de trois paramètres du modèle, le pourcentage d'eau d'irrigation pompée, la transmissivité de l'aquifère et son coefficient d'emmagasinement, est obtenue par calibration. Ces trois paramètres doivent donc être re-calibrés pour chaque jeu de données d'entrée différent. Le nombre de données d'entrée est très important, puisque 13 données différentes sont entrées à chacun des 166 pas de temps, soit 2158 données différentes en tout. L'exécution systématique de l'optimisation pour seulement trois valeurs différentes attribuées à chaque donnée d'entrée individuelle est donc inenvisageable à implémenter (elle demanderait 3^{2158} étapes d'optimisation qui durent environ 10 minutes chacune, ce qui prendrait environ 10^{1024} années).

Plutôt que de tester l'effet d'une incertitude aléatoire sur chaque donnée individuelle, l'effet d'un éventuel biais de mesure systématique fut testé. De

cette manière, la même incertitude peut être attribuée à tous les pas de temps pour une donnée, ce qui réduit le nombre de données différentes de 2158 à 13. Parmi ces 13 données, 6 représentent les valeurs des K_c de différentes cultures. Ces 6 valeurs étant moyennées dans le modèle, la même incertitude leur fut systématiquement associée, ce qui réduit le nombre de données différentes à 8. Finalement, seules deux valeurs différentes furent testées pour chacune de ces données, les incertitudes successivement ajoutées puis déduites des valeurs mesurées. Le nombre de scénarios testés est alors de 256 et le temps de calcul nécessaire est alors plus raisonnable (de l'ordre de 48h).

Notons que, les incertitudes n'étant plus considérées comme indépendantes, cette méthodologie revient à tester des scénarios extrêmes. Par exemple, la probabilité que la température soit systématiquement de 2° plus élevée que celle mesurée est assez faible. La probabilité que cela soit couplé à une pluviométrie systématiquement plus faible de 10% que la pluviométrie mesurée est plus faible encore. L'impact mesuré sur les paramètres et les résultats de sortie risque donc d'être surestimé.

Pour rappel, les résultats analysés au chapitre 3.3 sont issus de l'optimisation du modèle par rapport au niveau de la nappe uniquement avec une proportion d'eau d'irrigation pompée *p* fixe. Par souci de cohérence, les incertitudes ici présentées sont également obtenues à l'aide de cette même fonction objectif (tableau 32).

Tableau 32 : Impact de la qualité des données d'entrée sur les paramètres et résultats du modèle. La colonne « valeur de référence » donne la valeur optimisée utilisée pour l'analyse réalisée au chapitre 3.3. La colonne « valeurs alternatives » donne la moyenne ± l'écart type des valeurs obtenues pour les 256 scénarios testés pour mesurer l'impact de la qualité des données d'entrée.

	Valeur de référence	**Valeurs alternatives**
Pourcentage d'eau d'irrigation pompée *p* [%]	41.9	46.1 ± 14.5
Transmissivité de l'aquifère *T* [m²/s]	0.0023	0.0024 ± 0.0004
Coefficient d'emmagasinement de l'aquifère *e* [%]	5.2	5.2 ± 0.6
Résultat de la fonction objectif [m²]	159	161 ± 10

Les trois paramètres du modèle montrent des sensibilités différentes à la qualité de données d'entrée. Le coefficient d'emmagasinement varie très peu lorsque ces données d'entrée varient, son écart type valant 12% de sa valeur

moyenne. Sa valeur de référence, très proche de sa valeur moyenne, peut donc être considérée comme fiable.

La transmissivité de l'aquifère est *a priori* plus sensible à la qualité des données d'entrée, son écart type valant 17% de sa valeur moyenne. Toutefois, la valeur réelle de la transmissivité est très incertaine et la gamme de valeurs testée pour ce paramètre s'échelonne de 10^{-5} à 10^{-1} m²/s. Au regard de la gamme de variation testée, l'intervalle est réduit de plusieurs ordres de grandeur et la valeur ici obtenue peut donc également être considérée comme fiable.

Le pourcentage d'eau d'irrigation pompée obtenu pour les scénarios testés est en moyenne assez proche de la valeur de référence utilisée au chapitre 3.3. Ces valeurs sont toutefois très variables (figure 43). Deux données d'entrée en particulier influencent en effet fortement ces valeurs : les valeurs de K_c et les valeurs d'*efficience de l'irrigation*. Les autres données d'entrée ont un effet moindre sur ces valeurs (tableau 33).

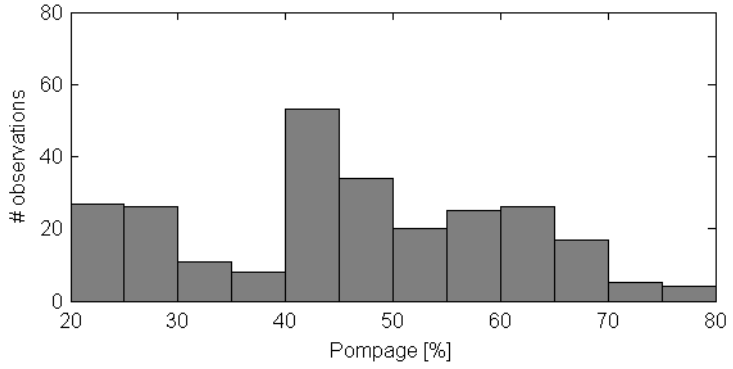


Figure 43 : Distribution des valeurs de pourcentage d'eau d'irrigation pompée obtenues par optimisation pour les 256 scénarios testés pour mesurer l'impact de la qualité des données d'entrée.

Tableau 33 : Moyennes et écarts types des pourcentages d'eau d'irrigation pompée en fonction des scénarios testés pour mesurer l'impact de la qualité des données d'entrée : influence de K_c et de l'efficience de l'irrigation η.

	K_c	
η	- 20%	+ 20%
- 10%	63.1 ± 6.1	43.8 ± 2.6
+ 10%	51.1 ± 8.0	26.2 ± 3.5

Trois cas de figure peuvent ainsi être distingués (tableau 33). Si les valeurs de K_c et de η sont simultanément diminuées, le pourcentage d'eau d'irrigation pompée est de 63.1%, ce qui est une valeur très élevée. Si, à l'inverse, ces valeurs sont simultanément augmentées, le pourcentage d'eau pompée est de 26.2%, une valeur très faible. Enfin, si la valeur de K_c est augmentée tandis que l'*efficience de l'irrigation* est diminuée ou *vice versa*, ces variations semblent se compenser mutuellement et le pourcentage d'eau pompée varie entre 43 et 52%, des valeurs légèrement supérieures à la valeur de référence. Au sein de ces trois cas de figure, la variabilité est faible.

Pour comprendre cette sensibilité, il faut se remémorer les conclusions de l'analyse du fonctionnement du modèle présentée au chapitre 3.3. La dynamique de la hauteur de nappe représentée par le modèle est principalement influencée par les flux verticaux. Les géologues ayant travaillé sur la plaine des Triffa montrent, à l'inverse, que les flux verticaux contribuent de manière nettement moins significative au bilan de la nappe. La conclusion tirée est que la dynamique des flux latéraux serait assez mal représentée par le modèle et que la dynamique des flux verticaux compenserait cette mauvaise représentation.

L'étude de la variation de la valeur du paramètre p en fonction des données d'entrée montre que sa valeur augmente très fortement lorsque les valeurs de K_c et de η diminuent simultanément. Lorsque les valeurs de η diminuent, une plus grosse proportion de l'eau appliquée retourne à la nappe et les transferts du barrage vers la nappe sont accrus ; les pressions sur la nappe sont donc atténuées. Lorsque les valeurs de K_c diminuent, la quantité d'eau d'irrigation totale appliquée diminue et le pompage diminue donc également ; les pressions sur la nappe sont donc également atténuées. Tout semble donc indiquer que, dans le cas d'une diminution significative des pressions sur la nappe, l'augmentation de la valeur du facteur p permet de compenser cette diminution des pressions sur la nappe et donc de représenter correctement la dynamique de la nappe. En ce sens, ce paramètre doit donc être interprété comme un paramètre d'ajustement des apports verticaux plus que comme un paramètre de pompage en tant que tel.

Enfin, les performances globales du modèle semblent peu influencées par la qualité des données d'entrée (tableau 32). Pour tous les scénarios testés, la dynamique à long terme semble respectée, avec un cycle de diminution-augmentation-diminution-augmentation du niveau (figure 44). Seules certaines variations ponctuelles peuvent parfois être amplifiées ou atténuées.

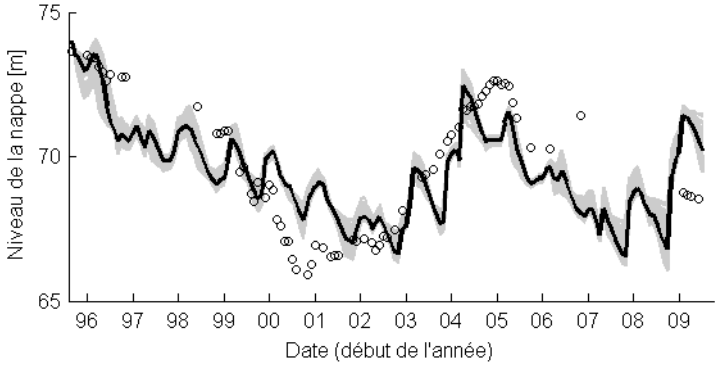


Figure 44 : Evolution des niveaux de la nappe mesurés (cercles) et modélisés pour les 256 scénarios testés pour mesurer l'impact de la qualité des données d'entrée (lignes grises) et pour la situation de référence (ligne noire).

L'écart entre les données mesurées et les scénarios, quels qu'ils soient, indique que l'écart entre les niveaux de la nappe mesurés et modélisés pour la situation de référence ne peut être imputé à l'incertitude sur les données d'entrée. Cela confirme les limites de la structure du modèle précédemment mises en évidence.

En termes de valeurs de la fonction objectif, qui représente la somme des carrés des résidus entre le niveau de nappe modélisé et celui mesuré, les valeurs varient de 150 à 198 m² (figure 45), contre 159 m² pour la situation de référence. La valeur moyenne des fonctions objectif des scénarios, 161 m², est très proche de celle de la situation de référence et leur écart type est égal à 10% de cette valeur (tableau 32). Cette sensibilité est donc tout à fait acceptable.

L'impact de la qualité des données d'entrée sur les paramètres et résultats du modèle est donc limité. La seule exception notable concerne le pourcentage d'eau d'irrigation pompée, qui servirait de paramètre d'ajustement pour compenser les faiblesses de la structure du modèle. La méthode de modélisation ici développée est donc appropriée aux données disponibles et à la qualité de ces données.

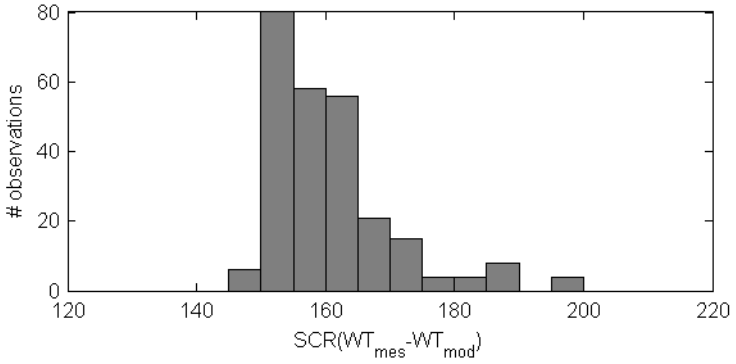


Figure 45 : Distribution des valeurs de la fonction objectif (somme des carrés des résidus entre le niveau de nappe modélisé et celui mesuré) obtenues par optimisation pour les 256 scénarios testés pour mesurer l'impact de la qualité des données d'entrée.

Etude des performances de l'irrigation

L'incertitude associée aux données est beaucoup plus grande pour les performances de l'irrigation. En effet, les thèmes abordés sont beaucoup plus larges, qu'il s'agisse des aspects environnementaux (énergie…) ou, *a fortiori*, des aspects économiques et sociaux. Les données nécessaires sont donc beaucoup plus nombreuses et une attention moindre peut donc être dédiée à ces données. Ensuite, en particulier concernant les données économiques ou sociales, la collecte systématique de ces données est beaucoup plus fastidieuse que pour les données physiques puisque, dans la majorité des cas, une automatisation des mesures n'est pas envisageable. Enfin, la nature même de ces données les rend incertaines. Plusieurs données socio-économiques sont en effet vues comme sensibles par les acteurs du monde agricole. Il s'agit par exemple des données liées à la productivité, aux aspects financiers, à l'emploi. Outre une certaine discrétion naturelle souvent de mise concernant ces aspects, une certaine prudence dans la communication peut biaiser ces données en raison de pratiques non légales (utilisation de matériel de contrebande, travail non déclaré…).

Pour toutes ces raisons, les données nécessaires à la quantification des performances de l'irrigation furent plus compliquées à collecter et l'incertitude associée à ces données est beaucoup plus importante que celle associée aux données utilisées dans les précédentes parties de ce travail. Afin de pallier au problème de disponibilité des données, la quantification des indicateurs de performance fut limitée aux agriculteurs personnellement

rencontrés. Plusieurs données demandées aux administrations compétentes n'ont en effet jamais pu être obtenues. La quantification des indicateurs pour l'ensemble des agriculteurs de la zone d'étude, initialement programmée, a donc dû être abandonnée sous peine de voir le nombre d'indicateurs possibles à quantifier trop sévèrement réduit.

Les données collectées lors d'entretiens réalisés directement auprès des agriculteurs lors des campagnes de terrain effectuées en 2012 et 2013 ont donc été utilisées. Bien que directement collectées auprès des agriculteurs, ces données n'en restent pas moins incertaines pour toutes les raisons déjà mentionnées. Une attention toute particulière était donc de mise lors de l'analyse des résultats des indicateurs de performance de l'irrigation. Si l'analyse de ces résultats repose sur des méthodes statistiques robustes dans lesquelles l'incertitude associée aux données n'est pas explicitement prise en compte, la discussion et les conclusions se gardent d'être trop quantitatives. Elles se concentrent sur les aspects qualitatifs avec une attention particulière à la compréhension des processus qui peuvent motiver la décision d'adopter la technologie goutte-à-goutte.

Bien que le manque de quantification des résultats de cette analyse puisse être déploré, le faible nombre de données disponibles et la faible qualité des données disponibles empêchent de tirer des conclusions chiffrées. Leur analyse repose par contre sur des méthodes statistiques robustes et permet de mettre en évidence un certain nombre de processus.

La prise en compte explicite et dès le début du travail de la problématique des données sous tous ses aspects – existence, disponibilité, qualité - nous a permis de développer une méthodologie appropriée. De cette manière, l'information tirée de ces données est importante et leur utilisation est cohérente avec leur qualité.

Conclusion

Les ressources en eau sont aujourd'hui sous pression dans de nombreuses régions du globe. En tant que principal consommateur d'eau, l'agriculture irriguée fait donc face à une attention croissante. La technologie goutte-à-goutte est ainsi fréquemment promue en raison du potentiel d'économie d'eau qu'elle représente. Les résultats concrets ne sont par contre pas toujours à la hauteur des résultats escomptés et cette mesure fait donc régulièrement débat. Afin d'alimenter ce débat, le présent travail fait le point sur le potentiel de cette technologie en termes d'impact sur les ressources en eau d'une part mais aussi dans une perspective plus large qui intègre la multiplicité des préoccupations des acteurs de l'agriculture.

La thèse défendue est que les objectifs effectivement poursuivis par les agriculteurs adoptant cette technologie divergent des objectifs déclarés d'économie d'eau. Pour cette raison, le déploiement de cette technique ne serait pas en mesure de permettre une économie d'eau à grande échelle.

La démonstration de cette thèse se base sur une étude de cas spécifique, la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans le CMV103 du périmètre irrigué de la plaine des Triffa (Maroc Oriental). Elle s'articule en deux étapes. Dans un premier temps, l'attention est portée à l'efficience de l'irrigation. Ce chapitre permet de quantifier les impacts de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte en termes d'utilisation d'eau et de pressions sur les ressources en eau. Dans un second temps, l'impact de cette conversion sur la performance est analysé et les objectifs effectivement poursuivis par les agriculteurs adoptant la technologie goutte-à-goutte sont ainsi identifiés.

En analysant l'efficience de l'irrigation à l'échelle de la parcelle, la notion d'*effet d'usage* est tout d'abord mise en évidence, l'efficience de l'irrigation étant dès lors le produit d'une *efficience technique* et de cet *effet d'usage*. Cet *effet d'usage*, qui dépend de la gestion *M* de l'agriculteur, est formulé comme une fonction de cette gestion $e_u(M)$. Les résultats ainsi obtenus montrent que l'influence de la technologie est nettement plus faible que celle de l'usage sur l'efficience de l'irrigation. L'*effet d'usage* varie en effet de 29 à 174% lorsque l'irrigation gravitaire est pratiquée et cette variance est corrélée à la proportion de culture d'agrumes au sein de l'exploitation. Il varie de 15 à 121% avec l'irrigation goutte-à-goutte et cette variation est alors corrélée à la taille de l'exploitation. Cette quantification confirme la nécessité d'expliciter la notion d'usage pour évaluer l'efficience de

l'irrigation et donne la mesure de son impact. En effet, l'usage peut, dans le meilleur des cas, diviser par 3 (avec une valeur minimale de 30%) ou multiplier par 1.2 (avec une valeur maximale de 120%) l'efficience technique moyenne de la technologie utilisée. Ces résultats confirment par ailleurs la pertinence de considérer deux relations d'usage différentes selon le type d'irrigation.

La gestion de l'agriculteur et la technique d'irrigation sont endogènes. L'approche *ESR* (*endogenous switching regression*) permet de manipuler de telles variables. Son implémentation a permis d'expliciter la fonction d'*effet d'usage*, qui varie selon le type d'irrigation. Elle permet en outre d'identifier les indicateurs les plus pertinents de la gestion *M* pour notre cas d'étude. Cette gestion, représentée par la taille de l'exploitation et son taux de spécialisation, varie selon le type d'irrigation, avec des exploitations en moyenne plus grandes et une proportion d'exploitations spécialisées bien plus importante lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée. La formulation de deux fonctions d'*effet d'usage* $e_{u_T1}(M_{T1})$ et $e_{u_T2}(M_{T2})$, une pour chaque technique d'irrigation, est donc pleinement justifiée. Elle confirme l'influence de la taille pour les exploitations irriguées au goutte-à-goutte et montrent une influence positive du taux de spécialisation sur les valeurs d'*effet d'usage* pour les petites exploitations pratiquant l'irrigation gravitaire. Elle révèle également une absence totale de considération pour la quantité d'eau consommée dans les exploitations spécialisées de taille moyenne.

Sur le plan méthodologique, cette approche originale combinant un modèle hydrologique pour le calcul des valeurs d'efficience et un modèle économique pour l'analyse de cette efficience présente de nombreux avantages. Lorsque de telles analyses sont implémentées, l'approche la plus fréquente pour le calcul de l'efficience est l'utilisation de la *SFA* (*stochastic frontier analysis*) ou de la *DEA* (*data envelopment analysis*) et requiert en effet un grand nombre de données pour un grand nombre d'individus. Le traitement de ces données est ensuite généralement réalisé grâce à une régression *Tobit*, qui ne permet pas le traitement de l'endogénéité ici observée. La méthodologie ici développée est implémentée avec des données relatives à 25 exploitations à peine et l'approche *ESR* donne de bons résultats tout en traitant explicitement la question de l'endogénéité. Ce nombre de 25 exploitations représente toutefois une limite minimum qui explique une certaine instabilité du modèle *ESR*.

Sur cette base, l'impact d'un changement de technique d'irrigation de grande ampleur peut être étudié. Pour ce faire, l'utilisation d'un modèle

hydrologique représentant le cycle de l'eau à l'échelle de la zone d'étude et intégrant l'impact de l'usage quantifié précédemment rencontre les recommandations formulées par de nombreux auteurs. Elle combine en effet la prise en compte des conditions réelles, l'influence de la gestion et intègre les effets d'échelles observés lors de l'extrapolation d'observations parcellaires à l'échelle régionale.

Cette approche montre que la proportion d'eau d'irrigation appliquée par rapport aux besoins tend à augmenter avec la conversion au goutte-à-goutte. Cette augmentation se traduit paradoxalement par une diminution des pressions sur la nappe d'eau souterraine. L'irrigation seule induit en effet une baisse moyenne du niveau de la nappe de 2.7 cm/mois lorsque moins de 5% des superficies sont irriguées au goutte-à-goutte et cette diminution est réduite à 0.7 cm/mois lorsque plus de 10% des superficies le sont. La demande en eau du réservoir du barrage Mohamed V est par contre accrue.

La quantification de l'influence de l'usage et son analyse au regard de la gestion des exploitations combinées à la modélisation hydrologique ne permettent donc pas de conclure que le large déploiement de l'irrigation goutte-à-goutte réduise les pressions sur les ressources en eau régionales. Malgré un potentiel élevé en termes d'efficience, cette technologie est très influencée par l'usage qui en est fait et conduit ainsi à une consommation d'eau agricole accrue. Cette augmentation se traduit par une demande plus importante en eau du barrage mais pourrait, paradoxalement, réduire les pressions sur la nappe d'eau souterraine. Seule une analyse complète et fine des spécificités de la zone d'étude, aussi bien en termes de gestion des exploitations que de fonctionnement hydrologique, permet de tirer de telles conclusions.

Le déplacement de l'attention au niveau des performances de l'irrigation permet d'élargir la réflexion à des aspects plus larges. La mise en place d'un processus d'évaluation des performances vise à identifier les objectifs effectivement poursuivis par l'agriculteur lors de la conversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans la plaine des Triffa au Maroc. Pour ce faire, une méthodologie de sélection d'indicateurs rigoureuse est élaborée. Elle part d'un cadre d'évaluation existant et, en appliquant de manière systématique un algorithme de sélection clairement établi, elle permet l'établissement d'une liste de 18 indicateurs pertinents au regard des objectifs poursuivis.

La quantification et l'analyse de ces indicateurs sont ensuite réalisées. Les valeurs pour l'irrigation goutte-à-goutte sont comparées aux valeurs pour l'irrigation gravitaire, considérées comme valeurs de référence. Sur le plan

environnemental, l'impact de la conversion à l'irrigation goutte-à-goutte est extrêmement mitigé et son impact économique est faible. Sur le plan social par contre, certaines avancées sont plus marquées. Ce processus d'évaluation permet de mettre en évidence un objectif explicitement poursuivi par les agriculteurs adoptant la technologie goutte-à-goutte, celui-ci étant lié aux conditions de travail. D'autres motivations socio-culturelles plus profondes peuvent être soupçonnées mais n'ont pu être confirmées dans le cadre de cette évaluation. De nombreux arguments sont fréquemment avancés par les instances officielles pour promouvoir l'irrigation goutte-à-goutte : l'économie d'eau, de meilleurs rendements et une productivité économique accrue. Il apparait toutefois que ce sont principalement des questions d'ordre social qui déterminent avant tout la volonté des agriculteurs d'adopter cette technologie. Cet état de fait pourrait, en partie, expliquer l'échec de cette conversion à améliorer les performances environnementales de l'irrigation.

Enfin, sur le plan méthodologique, ces conclusions doivent être nuancées car seuls les aspects liés aux quantités furent abordés, les questions de qualité ayant systématiquement été écartées. De nombreux problèmes liés à l'existence, la disponibilité et la qualité des données furent par ailleurs rencontrés. Cette problématique est d'ailleurs récurrente dans les travaux portant sur l'irrigation. La prise en compte, explicite et dès le début du travail, de cette problématique a permis de mettre en place plusieurs solutions pour améliorer l'accès aux données et de développer une méthodologie adaptée aux données disponibles et à leur qualité.

Le travail ici présenté ouvre un certain nombre de perspectives et permet de formuler une série de recommandations en vue d'orienter de futurs travaux portant sur des problématiques similaires. Les pistes d'amélioration les plus évidentes sont à mettre en lien avec les deux grandes limites soulignées dès la description des objectifs de ce travail.

La première serait d'ajouter à l'approche développée une dimension qualitative. Les enjeux liés à l'irrigation ne se limitent en effet pas aux quantités d'eau. Les questions liées à la qualité de l'eau d'irrigation et à l'impact de l'irrigation sur la qualité des sols et des ressources en eau régionales sont aussi cruciales que la question de la quantité et la transition à l'irrigation goutte-à-goutte mériterait donc d'être analysée sous cet angle.

La deuxième serait d'intégrer une notion de temporalité dans l'approche développée. Cette thèse quantifie l'influence de l'usage sur l'efficience et les performances de l'irrigation. Cet usage est évidemment évolutif dans le temps. L'introduction de la technologie goutte-à-goutte est récente dans la zone d'étude et il est hautement probable que l'usage qui est fait de ce

système, aujourd'hui encore fort influencé par la pratique de l'irrigation gravitaire, évolue pour être de plus en plus adapté aux spécificités de la technologie goutte-à-goutte. Intégrer cette notion de temporalité requiert toutefois un jeu de données nettement plus étoffé que celui utilisé dans le cadre de ce travail, ce qui nous amène à une troisième piste d'approfondissement.

La question des données, apparue à de nombreuses reprises dans ce travail, mobilise une quantité d'énergie et de moyens considérable. Elle conditionne par ailleurs la finesse des modèles utilisés puisque ceux-ci sont spécifiquement conçus pour être adaptés à ces données, à leur disponibilité et à leur qualité. Améliorer la quantité et la qualité des données utilisées serait donc nécessaire à tous points de vue. Les institutions marocaines impliquées dans la gestion de l'eau sont un vecteur incontournable pour améliorer la collecte et la mise à disposition des données, en particulier dans une perspective de suivi régulier et à long terme. Sensibiliser ces acteurs, clarifier et automatiser les processus de mise à disposition des données et surtout orienter les choix de manière à optimiser la collecte de données sont des actions qui doivent être entreprises par le monde scientifique. Les agriculteurs eux-mêmes, ainsi que les divers acteurs de terrain, sont un autre vecteur de collecte de données qui s'avère incontournable dans le domaine de l'irrigation. Impliquer ces acteurs dans le processus de recherche, les sensibiliser aux enjeux d'une collecte fiable, régulière et précise et faire de ces acteurs des partenaires de recherche est donc un moyen à privilégier pour rassembler un certain nombre de données, qui sont un prérequis indispensable à l'amélioration des méthodes développées dans ce travail. Les avancées récentes dans le domaine des « sciences citoyennes » pourraient constituer un catalyseur à cet égard.

La mise en œuvre de telles approches doit être réalisée en suivant des méthodes adaptées. Les savoirs propres aux sciences de l'ingénieur doivent donc être combinés à ceux des sciences sociales et des sciences économiques. Une collaboration profonde et sincère entre scientifiques issus de ces différents domaines est dès lors indispensable pour mener à bien un tel projet. L'introduction de ce travail stipule que « la science de l'irrigation est complexe et multiple, à la croisée des sciences de la nature, des sciences économiques et des sciences sociales ». La recherche en science de l'irrigation doit donc en être de même.

Bibliographie

Alcon, F., M.D. de Miguel, and M. Burton. 2011. "Duration Analysis of Adoption of Drip Irrigation Technology in Southeastern Spain." *Technological Forecasting and Social Change* 78 (6): 991–1001.

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith, and others. 1998. *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome.

Ambroggi, R., E. Bolelli, and R. Bourgin. 1952. *Hydrogeologie Du Maroc (Zone Francaise).* XIXe Congrès Géologique International : Monographies Régionales. 3, Maroc ; 4. Alger: Rabat.

Bastiaanssen, W.G.M., R. G. Allen, P. Droogers, G. D'Urso, and P. Steduto. 2007. "Twenty-five Years Modeling Irrigated and Drained Soils: State of the Art." *Agricultural Water Management*, sec. 95.

Batchelor, C., V. R. Reddy, C. Linstead, M. Dhar, S. Roy, and R. May. 2014. "Do Water-saving Technologies Improve Environmental Flows?" *Journal of Hydrology* 518, Part A: 140 – 149.

Batt, H.A., and G.P. Merkley. 2010. "Water management and user association analysis for irrigation improvement in Egypt." *Irrigation and Drainage* 59 (2): 150–160.

Bell, S., and S. Morse. 2003. *Measuring Sustainability: Learning from Doing*. Earthscan, London. Stirling, VA.

Bendra, B., S. Fetouani, X. Laffray, M. Vanclooster, M. Sbaa, and L. Aleya. 2012. "Effects of Irrigation on Soil Physico-chemistry: A Case Study of the Triffa Plain (Morocco)." *Irrigation and Drainage* 61 (4): 507–519.

Benouniche, M., M. Kuper, J. Poncet, T. Hartani, and A. Hammani. 2011. "Quand Les Petites Exploitations Adoptent Le Goutte-à-goutte: Initiatives Locales Et Programmes Étatiques Dans Le Gharb (Maroc)." *Cahiers Agricultures* 20 (1): 40–47.

Benouniche, M., M. Zwarteveen, and M. Kuper. 2014. "Bricolage as Innovation: Opening the Black Box of Drip Irrigation Systems." *Irrigation and Drainage* 63 (5): 651–658.

Berbel, J., and L. Mateos. 2014. "Does Investment in Irrigation Technology Necessarily Generate Rebound Effects? A Simulation Analysis Based on an Agro-economic Model." *Agricultural Systems* 128: 25 – 34.

Bisconer, I. 2010. “Why Field Crop Growers Love Drip Irrigation: Alfalfa, Corn, Cotton, Onions, Potatoes and Processing Tomatoes.” In *ASABE - 5th National Decennial Irrigation Conference 2010, Held in Conjunction with Irrigation Show 2010*, 2:897–919.

Blanc, P. 2015. “Middle-East: Conflict’s Agrarian Sources [Proche-Orient: Géopolitique Des Dynamiques Agraires].” *Herodote* (156): 9–28.

Blanke, A., S. Rozelle, B. Lohmar, J. Wang, and J. Huang. 2007. “Water Saving Technology and Saving Water in China.” *Agricultural Water Management* 87 (2): 139–150.

Boelens, R., and J. Vos. 2012. “The Danger of Naturalizing Water Policy Concepts: Water Productivity and Efficiency Discourses from Field Irrigation to Virtual Water Trade.” *Agricultural Water Management* 108 (0): 16–26.

Bollen, M.J. S., F.H. W. M. Bekhuis, R. Reiling, and E. Scheper. 1995. “Toward a Spatial Pattern of the Vulnerability of Soil and Groundwater”. RIVM Report n° 711901012.

Borgia, C., M. García-Bolaños, and L. Mateos. 2012. “Patterns of variability in large-scale irrigation schemes in Mauritania.” *Agricultural Water Management* 112: 1–12.

Bos, M. G., M. A. S. Burton, and D. J. Molden. 2005. *Irrigation and Drainage Performance Assessment: Practical Guidelines*. CABI Publishing.

Bos, M. G., and J. Nugteren. 1990. “On irrigation efficiencies.” (19).

Boughriba, M., A. Melloul, Y. Zarhloule, and A. Ouardi. 2006. “Extension spatiale de la salinisation des ressources en eau et modèle conceptuel des sources salées dans la plaine des Triffa (Maroc nord-oriental).” *Comptes Rendus - Geoscience* 338 (11): 768–774.

Brisepierre, G. 2011. “Les Conditions Sociales Et Organisationnelles Du Changement Des Pratiques De Consommation D’énergie Dans L’habitat Collectif”. Paris (France): Université Paris Descartes - Sorbonne.

Burnham, M., Z. Ma, and D. Zhu. 2015. “The Human Dimensions of Water Saving Irrigation: Lessons Learned from Chinese Smallholder Farmers.” *Agriculture and Human Values* 32 (2): 347–360.

Burt, C.M., A.J. Clemmens, T.S. Strelkoff, K.H. Solomon, R.D. Bliesner, L.A. Hardy, T.A. Howell, and D.E. Eisenhauer. 1997. “Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123 (6): 423–442.

Campolongo, F., J. Cariboni, and A. Saltelli. 2007. “An Effective Screening Design for Sensitivity Analysis of Large Models.” *Environmental Modelling and Software* 22 (10): 1509–1518.

Carr, M. K. V. 2014. *Advances in Irrigation Agronomy : Fruit Crops*. Cambridge University Press.

Van Cauwenbergh, N. 2008. “Expert and local knowledge in decision support for natural resource management : analysis of capture and use”. UCL. - AGRO/MILA - Département des sciences du milieu et de l’aménagement du territoire.

———. 2014. “ALTAGUAX, a Case Study of Participatory Water Management in Drought Prone Areas of Southern Spain” presented at the Symposium - La politique agricole et de l’eau dans le bassin méditerranéen : vers une vision de développement durable du monde rural ?, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Van Cauwenbergh, N., K. Biala, C. Bielders, V. Brouckaert, L. Franchois, V. Garcia Cidad, M. Hermy, et al. 2007. “SAFE - A Hierarchical Framework for Assessing the Sustainability of Agricultural Systems.” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 120: 229–242.

Van Cauwenbergh, N., D. Pinte, A. Tilmant, I. Frances, A. Pulido-Bosch, and M. Vanclooster. 2008. “Multi-objective, Multiple Participant Decision Support for Water Management in the Andarax Catchment, Almeria.” *Journal of Environmental Geology* 54: 479–489.

Chandran, K. M., and U. Surendran. 2015. “Effect on Crop Yield And Perceptions of Farmers on Drip Fertigation: Study from Kerala State, India.” *International Journal of Scientific Research* 4 (10).

———. 2016. “Study of Factors Influencing the Adoption of Drip Irrigation by Farmers in Humid Tropical Kerala, India.” *International Journal of Plant Production* 3 (10).

de Chevron-Villette, A. 1956a. *Notes Sur Les Sols Des Triffa*. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer - Genie Rural Maroc.

———. 1956b. “Notes Sur Les Sols Des Triffa”. Office de la Racherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris.

Clarck A. K., and M. Aniq. 1993. “Canal Irrigation and Development Opportunities for the Indus Right Bank in Sindh and Balochistan.” *ICID Bulletin, Vol. 42(1).*

Cooley, H., J. Christian-Smith, and P. Gleick. 2009. *Sustaining California Agriculture in an Uncertain Future*. Pacific Institute.

Corominas, J. 2010. “Agua y Energía En El Riego, En La Época De La Sotenibilidad.” *Ingeniería Del Agua* 17 (3).

Darouich, H., J. M. Gonçalves, A. Muga, and L. S. Pereira. 2012. "Water Saving Vs. Farm Economics in Cotton Surface Irrigation: An Application of Multicriteria Analysis." *Agricultural Water Management* 115: 223 – 231.

Darouich, H. M., C. M. G. Pedras, J. M. Gonçalves, and L. S. Pereira. 2014. "Drip Vs. Surface Irrigation: A Comparison Focussing on Water Saving and Economic Returns Using Multicriteria Analysis Applied to Cotton." *Biosystems Engineering* 122: 74 – 90.

Dembélé, Y., S. Ouattara, and A. Keïta. 2001. "Application Des Indicateurs 'approvisionnement Relatif En Eau' Et 'productivité De L'eau' à L'analyse Des Performances Des Petits Périmètres Irrigués Au Burkina Faso." *Irrigation and Drainage* 50 (4): 309–321.

Dhehibi, B., L. Lachaal, M. Elloumi, and E. B. Messaoud. 2007. "Measuring Irrigation Water Use Efficiency Using Stochastic Production Frontier: An Application on Citrus Producing Farms in Tunisia." *Journal of Agricultural and Resource Economics* 1 (2).

Díaz, J.A.R., P. Montesinos, and E.C. Poyato. 2012. "Detecting Critical Points in On-Demand Irrigation Pressurized Networks - A New Methodology." *Water Resources Management* 26 (6): 1693–1713.

El Idrisy, H., and F. De Smedt. 2006. "Modelling Groundwater Flow of the Triffa Aquifer, Morocco." *Hydrogeology Journal* 14 (7): 1265–1276.

El-Shater, T., Y.A. Yigezu, A. Mugera, C. Piggin, A. Haddad, Y. Khalil, S. Loss, and A. Aw-Hassan. 2016. "Does Zero Tillage Improve the Livelihoods of Smallholder Cropping Farmers?" *Journal of Agricultural Economics* 67 (1): 154–172.

Evans, R.G., and E.J. Sadler. 2008. "Methods and Technologies to Improve Efficiency of Water Use." *Water Resources Research* 44 (7).

Fader, M., S. Shi, W. von Bloh, A. Bondeau, and W. Cramer. 2016. "Mediterranean Irrigation Under Climate Change: More Efficient Irrigation Needed to Compensate for Increases in Irrigation Water Requirements." *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20: 953–973.

Di Falco, S., and M. Veronesi. 2013. "How Can African Agriculture Adapt to Climate Change? A Counterfactual Analysis from Ethiopia." *Land Economics* 89 (4): 743–766.

FAO. 2011. *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW) - Managing Systems at Risk.* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London.

———. 2014. “Infographics on Water Resources and Uses”. FAO - Aquastat.

FAO, Forest management Division. 1992. *Foresterie En Zone Aride - Guide à L’intention Des Techniciens De Terrain*. FAO Conservation Guide.

Fekete, B. M., and E. Z. Stakhiv. 2014. “Performance Indicators in the Water Resources Management Sector.” In *The Global Water System in the Anthropocene*, ed. A. Bhaduri, J. Bogardi, J. Leentvaar, and S. Marx, 15–26. Springer Water. Springer International Publishing.

Fishelson, G., and D. Rymon. 1989. “Adoption of Agricultural Innovations: The Case of Drip Irrigation of Cotton in Israel.” *Technological Forecasting and Social Change* (35): 375–382.

Fishman, R., N. Devineni, and S. Raman. 2015. “Can Improved Agricultural Water Use Efficiency Save India’s Groundwater?” *Environmental Research Letters* 10 (8).

Foltz, J.D. 2003. “The Economics of Water-conserving Technology Adoption in Tunisia: An Empirical Estimation of Farmer Technology Choice.” *Economic Development and Cultural Change* 51 (2): 359–373.

Fraser, E. D. G., A. J. Dougill, W. E. Mabee, M. Reed, and P. McAlpine. 2006. “Bottom up and Top down: Analysis of Participatory Processes for Sustainability Indicator Identification as a Pathway to Community Empowerment and Sustainable Environmental Management.” *Journal of Environmental Management* 78 (2): 114 – 127.

Friedlander, L., A. Tal, and N. Lazarovitch. 2013. “Technical Considerations Affecting Adoption of Drip Irrigation in sub-Saharan Africa.” *Agricultural Water Management* 126: 125 – 132.

Gadanakis, Y., R. Bennett, J. Park, and F.J. Areal. 2015. “Improving Productivity and Water Use Efficiency: A Case Study of Farms in England.” *Agricultural Water Management* 160: 22–32.

Garb, Y., and L. Friedlander. 2014. “From Transfer to Translation: Using Systemic Understandings of Technology to Understand Drip Irrigation Uptake.” *Agricultural Systems* 128: 13 – 24.

García-Bolaños, M., C. Borgia, N. Poblador, M. Dia, O.M.V. Seyid, and L. Mateos. 2011. “Performance assessment of small irrigation schemes along the Mauritanian banks of the Senegal River.” *Agricultural Water Management* 98 (7): 1141–1152.

van Genuchten, M.T. 1980. “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.” *Soil Science Society of America Journal* 44 (5): 892–898.

Gorantiwar, S.D., and I.K. Smout. 2005. “Performance assessment of irrigation water management of heterogeneous irrigation schemes: 1. A framework for evaluation.” *Irrigation and Drainage Systems* 19 (1): 1–36.

Greyling, J. C. 2010. “Farm Size and Efficiency.”

Guillet, D. 2006. “Rethinking Irrigation Efficiency: Chain Irrigation in Northwestern Spain.” *Human Ecology* 34 (3): 305–329.

van Halsema, G. E., and L. Vincent. 2012. “Efficiency and Productivity Terms for Water Management: A Matter of Contextual Relativism Versus General Absolutism.” *Agricultural Water Management* 108 (0): 9–15.

Hamid, S.H., A.A. Mohamed, and Y.A. Mohamed. 2011. “Towards a performance-oriented management for large- scale irrigation systems: Case study, Rahad scheme, Sudan.” *Irrigation and Drainage* 60 (1): 20–34.

Hanak, E., J. Lund, A. Dinar, B. Gray, R. Howitt, J. Mount, P. Moyle, and B. B. Thompson. 2010. *Myths of California Water-Implications and Reality*. Public Policy Institute of California.

Hargreaves, G.H., and R.G. Allen. 2003. “History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129 (1): 53–63.

Hassanli, A.M., S. Ahmadirad, and S. Beecham. 2010. “Evaluation of the Influence of Irrigation Methods and Water Quality on Sugar Beet Yield and Water Use Efficiency.” *Agricultural Water Management* 97 (2): 357–362.

Huffaker, R., and N. Whittlesey. 2003. “A Theorical Analysis of Economic Incentive Policies Encouraging Agricultural Water Conservation.” *Water Resources Development* 19 (1): 37–55.

Huntington, H. P., P. K. Brown-Schwalenberg, Kathryn J. Frost, M. E. Fernandez-Gimenez, David D. Norton, and D. Rosenberg. 2002. “Observations on the Workshop as a Means of Improving Communication Between Holders of Traditional and Scientific Knowledge.” *Environmental Management* 30 (6): 778–792.

IEG, (Independent Evaluation Group). 2012. *Adapting to Climate Change: Assessing the World Bank Group Experience (Phase III).*

Javaux, M. 2012. “Cours LBRES2104 : Hydraulique Des Canaux Découverts Et Irrigation”. Université catholique de Louvain.

Johnson, N., C. Revenga, and J. Echeverria. 2001. “Managing Water for People and Nature.” *Science* 292 (5519): 1071–1072.

Jury, W.A., and H. Vaux Jr. 2005. “The Role of Science in Solving the World’s Emerging Water Problems.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102 (44): 15715–15720.

Kabunga, N.S., T. Dubois, and M. Qaim. 2012. “Yield Effects of Tissue Culture Bananas in Kenya: Accounting for Selection Bias and the Role of Complementary Inputs.” *Journal of Agricultural Economics* 63 (2): 444–464.

Kaneko, S., K. Tanaka, T. Toyota, and S. Managi. 2004. “Water Efficiency of Agricultural Production in China: Regional Comparison from 1999 to 2002.” *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology* 3 (3-4): 231–251.

Karagiannis, G., V. Tzouvelekas, and A. Xepapadeas. 2003. “Measuring Irrigation Water Efficiency with a Stochastic Production Frontier: An Application to Greek Out-of-season Vegetable Cultivation.” *Environmental and Resource Economics* 26 (1): 57–72.

Khan, S., A. Abbas, H.F. Gabriel, T. Rana, and D. Robinson. 2008. “Hydrologic and Economic Evaluation of Water-saving Options in Irrigation Systems.” *Irrigation and Drainage* 57 (1): 1–14.

Khan, S., R. Tariq, C. Yuanlai, and J. Blackwell. 2006. “Can Irrigation Be Sustainable?” *Agricultural Water Management* 80: 87–99.

Khanna, M., M. Isik, and D. Zilberman. 2002. “Cost-effectiveness of Alternative Green Payment Policies for Conservation Technology Adoption with Heterogeneous Land Quality.” *Agricultural Economics* 27 (2): 157–174.

Kharrou, M.H., M. Le Page, A. Chehbouni, V. Simonneaux, S. Er-Raki, L. Jarlan, L. Ouzine, S. Khabba, and G. Chehbouni. 2013. “Assessment of Equity and Adequacy of Water Delivery in Irrigation Systems Using Remote Sensing-Based Indicators in Semi-Arid Region, Morocco.” *Water Resources Management* 27 (13): 4697–4714.

Khattach, D., P. Keating, E.M. Mili, T. Chennouf, P. Andrieux, and A. Milhi. 2004. “Contribution of Gravimetry to the Study of Triffa Basin Structure (north-eastern Morocco): Hydrogeological Implications [Apport De La Gravimétrie à L’étude De La Structure Du Bassin Des Triffa (Maroc Nord-oriental) : Implications

Hydrogéologiques].” *Comptes Rendus - Geoscience* 336 (16): 1427–1432.

Kijne, J. 2002. *Unlocking the Water Potential of Agriculture*. Repport of the Water Source of Food Security conference. Land and Water Division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Knox, J.W., M.G. Kay, and E.K. Weatherhead. 2012. “Water Regulation, Crop Production, and Agricultural Water management—Understanding Farmer Perspectives on Irrigation Efficiency.” *Agricultural Water Management* 108 (0): 3–8.

Konikow, L. F., and E. Kendy. 2005. “Groundwater Depletion: A Global Problem.” *Hydrogeology Journal* 13 (1): 317–320.

van der Kooij, S. 2009. “Why Yunquera Will Get Drip Irrigation. Social Groups Identity and Construction of Meanings as an Approach to Understand Technological Modernization.” Wageningen (The Netherlands): Wageningen University.

———. 2016. “Performing Drip Irrigation by Farmer Managed Seguia Khrichfa Irrigation System, Morocco”. Wageningen University.

van der Kooij, S., M. Zwarteveen, H. Boesveld, and M. Kuper. 2013. “The Efficiency of Drip Irrigation Unpacked.” *Agricultural Water Management* 123: 103–110.

Kristensen, P. 2003. *EEA Core Set of Indicators*. European Environment Agency.

Kulecho, I.K., and E.K. Weatherhead. 2005. “Reasons for Smallholder Farmers Discontinuing with Low-cost Micro-irrigation: A Case Study from Kenya.” *Irrigation and Drainage Systems* 19 (2): 179–188.

Lankford, B. 2012a. “Fictions, Fractions, Factorials and Fractures; on the Framing of Irrigation Efficiency.” *Agricultural Water Management* 108 (0): 27–38.

———. 2012b. “Towards a Political Ecology of Irrigation Efficiency and Productivity.” *Agricultural Water Management* 108 (0): 1–2.

Lofgren, H., M. El-Said, and S. Robinson. 1999. “Trade Liberalization and Complementary Domestic Policies: a Rural-urban General Equilibrium Analysis of Morocco.” Ed. International Food Policy Research Institute (IFPRI). *TMD Discussion Paper* (41).

Lokshin, M., and Z. Sajaia. 2004. “Maximum Likelihood Estimation of Endogenous Switching Regression Models.” *The Stata Journal* 4 (3): 282–289.

Lopez-Gunn, E., P. Zorrilla, F. Prieto, and M.R. Llamas. 2012. “Lost in Translation? Water Efficiency in Spanish Agriculture.” *Agricultural Water Management* 108 (0): 83–95.

Lutter, S., and D. Schnepf. 2011. “Water Management Indicators - State of the Art for the Mediterranean Region.” In *Dialogues on Mediterranean Water Challenges: Rationale Water Use, Water Price Versus Value and Lessons Learned from the European Water Framework Directive*, 37–53. Bari : CIHEAM.

Maatougoui, A. 2014. “Politique Agricole De L’eau Au Maroc Et Développement Territorial” presented at the Symposium - La politique agricole et de l’eau dans le bassin mléditerranéen : vers une vision de développement durable du monde rural ?, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Malano, H., and M. Burton. 2001. “Guidelines for Benchmarking Performance in the Irrigation and Drainage Sector”. IPTRID Secretariat - FAO.

Mare, R. D., and C. Winship. 1987. “Endogenous Switching Regression Models for the Causes and Effects of Discrete Variables.” In *Common Problems in Qualitative Social Research*. Sage University Press. J. Scott Long.

Margat, J. 2005. “Quels Indicateurs Pertinents De La Pénurie D’eau?” *Géocarrefour* 80 (4).

Mathieu, C. 1981. “Evolution Morphologique Des Sols Soumis à L’irrigation Gravitaire En Basse Moulouya (Maroc Oriental)”. Université de Liège.

MEEDDM. 2004. *Stratégie Nationale Pour La Biodiversité: Présentation Des Indicateurs De Suivi De La Biodiversité Proposés Pour La Métropole*. Ministère de l’Ecologie, de l’Energie, du Développement Durable et de la Mer, République Française.

Merry, R.E. 2003. “‘Dripping with Success’: The Challenges of an Irrigation Redevelopment Project.” *Irrigation and Drainage* 52 (1): 71–83.

Molden, D., M. Burton, and M. G. Bos. 2007. “Performance Assessment, Irrigation Service Delivery and Poverty Reduction: Benefits of Improved System Management.” *Irrigation and Drainage* 56 (2-3): 307–320.

Molden, D., R. Sakthivadivel, C. Perry, C. De Fraiture, and W. Kloezen. 1998. *Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems*. Vol. 20. IWMI.

Monaghan, J. M., A. Daccache, L. H. Vickers, T. M. Hess, E K. Weatherhead, I. G. Grove, and J. W. Knox. 2013. “More ‘crop Per Drop’: Constraints and Opportunities for Precision Irrigation in European Agriculture.” *Journal of the Science of Food and Agriculture* 93 (5): 977–980.

Morris, M.D. 1991. “Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments.” *Technometrics* 33 (2): 161–174.

Mortier, F. 1958. “Eléments Pour L’établissement Du Bilan De La Nappe Phréatique De La Plaine Des Triffa (Maroc Oriental).”

Moumen, A., H. J. Oulidi, L. Khazaz, and B. El Mansouri. 2015. “Système d’Information d’Eau Au Maroc : Etat D’art, Problématique, Approche Et Prototype.” In Rabat (Ma).

Muller, M. 2009. “Appendix 1 : World Water Development Report Indicators.” In *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. Paris: UNESCO - World Water Assessment Programme.

Murray-Rust, D.H., and W.B. Snellen. 1993. “Irrigation System Performance Assessment and Diagnosis”. International Irrigation Management Institute.

Musy, A., and C. Higy. 2009. *Hydrologie : Une Science De La Nature*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Science & Ingénierie De L’environnement. Lausanne.

Narayanamoorthy, A., N. Devika, and M. Bhattarai. 2016. “More Crop and Profit Per Drop of Water: Drip Irrigation for Empowering Distressed Small Farmers.” *IIM Kozhikode Society & Management Review* 5 (1): 83–90.

Negri, D. H., and J. J. Hanchar. 1989. “Water Conservation Through Irrigation Technology.” *Agricultural Information Bulletin* (576). Economic Research Servive, USDA.

Noltze, M., S. Schwarze, and M. Qaim. 2013. “Impacts of Natural Resource Management Technologies on Agricultural Yield and Household Income: The System of Rice Intensification in Timor Leste.” *Ecological Economics* 85: 59–68.

Northoff, E. 2003. “More Crop Per Drop.” *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

Olmstead, S.M. 2010. “The Economics of Managing Scarce Water Resources.” *Review of Environmental Economics and Policy* 4 (2): 179–198.

ORMVAM. 2006. “Revue De l’ORMVAM”. Office Régional de Mise en Valeur Agricole de la Moulouya (Berkane).

Peeters, A., C. Bielders, M. Hermy, E. Mathijs, B. Muys, and Marnik Vanclooster. 2005. *Framework for Assessing Sustainability Levels in Belgian Agricultural Systems (SAFE): Part 1 - Sustainable Production and Consumption Patterns*. Scientific Support Plan for a Sustainable Development Policy (SPSD II). Belgian Science Policy.

Pereira, L. S., I. Cordery, and I. Iacovides. 2012. “Improved Indicators of Water Use Performance and Productivity for Sustainable Water Conservation and Saving.” *Agricultural Water Management* 108 (0): 39–51.

Pereira, L.S., T. Oweis, and A. Zairi. 2002. “Irrigation Management Under Water Scarcity.” *Agricultural Water Management* 57 (3): 175–206.

Pergola, M., M. Favia, A.M. Palese, B. Perretti, C. Xiloyannis, and G. Celano. 2013. “Alternative Management for Olive Orchards Grown in Semi-arid Environments: An Energy, Economic and Environmental Analysis.” *Scientia Horticulturae* 162: 380–386.

Perry, C. 2007. “Efficient Irrigation; Inefficient Communication; Flawed Recommendations.” *Irrigation and Drainage* 56 (4): 367–378.

———. 2008. “Reply: Efficient Irrigation; Inefficient Communication; Flawed Recommendations: Response to Comment.” *Irrigation and Drainage* 57 (2): 249–252.

———. 2011. “Accounting for Water Use: Terminology and Implications for Saving Water and Increasing Production.” *Agricultural Water Management* 98 (12) (October): 1840–1846.

Peterson, J.M., and D. Ya. 2005. “Economic Adjustments to Groundwater Depletion in the High Plains: Do Water-saving Irrigation Systems Save Water?” *American Journal of Agricultural Economics* 87 (1): 147–159.

Pfeiffer, L., and C.-Y.C. Lin. 2014. “Does Efficient Irrigation Technology Lead to Reduced Groundwater Extraction? Empirical Evidence.” *Journal of Environmental Economics and Management* 67 (2): 189–208.

Phadnis, S. S., and M. Kulshrestha. 2013. “Evaluation for Measuring Irrigation Service Performance Using a Scorecard Framework.” *Irrigation and Drainage* 62 (2): 181–192.

Phadnis, S.S., and M. Kulsreshtha. 2011. “Need of Benchmarking for socially and environmentally sustainable development of a major irrigation.” *Water and Energy International* 68 (1): 30–36.

Plusquellec, H., and M. Bachri. 2013. “Le Respect Des Droits D’eau Lors De La Rehabilitation Des Perimetres Traditionnels Au Maroc.” *Irrigation and Drainage* 62 (5): 695–707.

Polimeni, J.M., K. Mayumi, M. Giampietro, and B. Alcott. 2012. *The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements*.

Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Fereres. 2015. “AquaCrop Version 5.0 : Reference Manual”. FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.

Rao, P. S. 1993. “Review of Selected Literature on Indicators of Irrigation Performance”. International Irrigation Management Institute (IIMI), Colombo, Sri Lanka.

Reed, M., E. D. G. Fraser, S. Morse, and A. J. Dougill. 2005. “Integrating Methods for Developing Sustainability Indicators to Facilitate Learning and Action.” *Ecology and Society* (10).

Reed, M. S., E. D. G. Fraser, and A. J. Dougill. 2006. “An Adaptive Learning Process for Developing and Applying Sustainability Indicators with Local Communities.” *Ecological Economics* 59 (4): 406 – 418.

Reis Dos Santos, I.M., and P.M. Reis Dos Santos. 2016. “Switching Regression Metamodels in Stochastic Simulation.” *European Journal of Operational Research* 251 (1): 142–147.

Renault, D., R. Wahaj, and S. Smits. 2013. *Multiple Use of Water Services in Large Irrigation Systems - Auditing and Planning Modernization - The MASSMUS Approach*. FAO Irrigation and Drainage Paper. Rome: Food and Agrculture Organization of the United Nations.

Rodrigues, G. C., P. Paredes, J. M. Gonçalves, I. Alves, and L. S. Pereira. 2013. “Comparing Sprinkler and Drip Irrigation Systems for Full and Deficit Irrigated Maize Using Multicriteria Analysis and Simulation Modelling: Ranking for Water Saving Vs. Farm Economic Returns.” *Agricultural Water Management* 126: 85 – 96.

Ruellan, A. 1971. “Les Sols à Profil Calcaire Différencié Des Plaines De La Basse Moulouya (Maroc Oriental)”. Paris: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM).

Salhi, S., A. Imache, J.P. Tonneau, and M.Y. Ferfera. 2012. “Les Déterminants De L’adoption Du Système D’irrigation Par Goutte-à-goutte Par Les Agriculteurs Algériens De La Plaine De La Mitidja.” *Cahiers Agricultures* 21 (6): 417–426.

Sam-Amoah, L.k., and J.w. Gowing. 2001. “Assessing the Performance of Irrigation Schemes with Minimum Data on Water Deliveries1.” *Irrigation and Drainage* 50 (1): 31–39.

Sarwar, A., W. G. M. Bastiaanssen, and R. A. Feddes. 2001. “Irrigation Water Distribution and Long-term Effects on Crop and Environment.” *Agricultural Water Management* 50 (2): 125 – 140.

Schaap, M. G., F. J. Leij, and M. T. van Genuchten. 2001. “Rosetta: A Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions.” *Journal of Hydrology* 251 (3): 163–176.

Scheierling, S.M., R.A. Young, and G.E. Cardon. 2006. “Public Subsidies for Water-conserving Irrigation Investments: Hydrologic, Agronomic, and Economic Assessment.” *Water Resources Research* 42 (3).

Schneider, F. 2010. “The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements.” *Journal of Cleaner Production* 18 (6): 600 – 602.

Sellami, H. 2014. “Uncertainty Assessment of Hydrological Impacts of Climatic Change in Small Mediterranean Catchments”. Louvain-la-Neuve, Belgique: Université catholique de Louvain.

Sese-Minguez, S. 2012. “Perspectives of Different Stake Holders to Implement Drip Irrigation Systems and Its Consequences for Land and Water Use: A Case Study in Cànyoles River Basin, Vanlenvia (Spain)”. Wageningen University.

Siebert, S., M. Kummu, M. Porkka, N. Ramankutty, and Bridget R. Scanlon. 2015. “A Global Data Set of the Extent of Irrigated Land from 1900 to 2005.” *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19: 1521–1545.

Sivanappan, RK. 2016. “Micro Irrigation Technology in India: A Success Story.” In *Innovations in Micro Irrigation Technology*, 1–45. Research Advances in Sustainable Micro Irrigation. Apple Academic Press.

Skaggs, R. K., and Z. Samani. 2005. “Farm Size, Irrigation Practices, and On-farm Irrigation Efficiency.” *Irrigation and Drainage* 54 (1): 43–57.

Smith, L. E. D. 1990. “An Economist’s Perspective on Irrigation Performance Assessment: With Examples from Large Scale Irrigation in Morocco.” *Irrigation and Drainage Systems* 4 (4) (November 1): 329–343.

Speelman, S., M. D'Haese, J. Buysse, and L. D'Haese. 2008. "A Measure for the Efficiency of Water Use and Its Determinants, a Case Study of Small-scale Irrigation Schemes in North-West Province, South Africa." *Agricultural Systems* 98 (1): 31–39.

Stevens, J. B. 2006. "Adoption of Irrigation Scheduling Methods in South Africa". Pretoria: University of Pretoria.

Stubbs, M. 2011. *Environmental Quality Incentives Program (EQIP): Status and Issues*.

Svendsen, M., M. Ewing, and S. Msangi. 2008. *Les Échelles De Crue : Des Indicateurs De Performance Pour Le Secteur De L'irrigation En Afrique Subsaharienne*. International Food Policy Research Institute (IFPRI).

Tarlow, K.R. 2016. "Teaching Principles of Inference with ANOVA." *Teaching Statistics* 38 (1): 16–21.

Taylor, J. R. 1997. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. Univ Science Books.

Tiercelin, J.-R. 2006. *Traité D'irrigation. : 2è Édition*. Tec & Doc Lavoisier.

Tuabu, O. K. 2012. "The Innovation of Low-cost Drip Irrigation Technology in Zambia. A Study of the Development of Drip by International Development Enterprises and Smallholder Farmers." Wageningen (The Netherlands): Wageningen University.

UN-ECE, and UN-ECA. 2013. *Environmental Performance Reviews: Morocco*. United Nations - Economic Commission for Europe.

UN-TFIMR, and Water Task Force on Indicators, Monitoring and Reporting. 2009. *Final Report - Monitoring Progress in the Water Sector: A Selected Set of Indicators*.

UN-WWAP, and (United Nations World Water Assessment Programme). 2009. *Final Report of the Expert Group on Indicators, Monitoring, and Data Bases (EG-IMD) Including Proposed Programme to Mobilise Information to Support Decision Making About Water Resources*. Programme Office for Global Water Assessment, UNESCO, ,Italy.

Venot, J.-P., M. Zwarteveen, M. Kuper, H. Boesveld, L. Bossenbroek, S.V.D. Kooij, J. Wanvoeke, et al. 2014. "Beyond the Promises of Technology: A Review of the Discourses and Actors Who Make Drip Irrigation." *Irrigation and Drainage* 63 (2): 186–194.

Vörösmarty, C.J., B. Fekete, and B.A. Tucker. 1998. "River Discharge Database, Version 1.1 (RivDIS V1.0 Supplement)". Institute for the

Study of Earth, Oceans, and Space, University of New Hampshire, Durham NH (USA).

Wang, X.-Y. 2010. "Irrigation Water Use Efficiency of Farmers and Its Determinants: Evidence from a Survey in Northwestern China." *Agricultural Sciences in China* 9 (9): 1326–1337.

Wanvoeke, J., J.-P. Venot, M. Zwarteveen, and C. de Fraiture. 2016. "Farmers' Logics in Engaging With Projects Promoting Drip Irrigation Kits in Burkina Faso." *Society and Natural Resources*: 1–15.

Ward, F.A., and M. Pulido-Velazquez. 2008. "Water Conservation in Irrigation Can Increase Water Use." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (47): 18215–18220.

Wasserman, L. 2004. *All of Statistics - A Concise Course in Statistical Inference*. Springer-Verlag New York.

WCD. 2000. *Dams and Development - A New Framework for Decision-making*. The Report of the World Commission on Dams. World Commission on Dams.

Weynants, M., H. Vereecken, and M. Javaux. 2009. "Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions: Introducing a Closed-form Hydraulic Model." *Vadose Zone Journal* 8 (1): 86–95.

Willardson, L. S., R. G. Allen, and H. D. Frederiksen. 1994. "Elimination of Irrigation Efficiencies." In *Acta 13th Tech. Conf. USCID. Denver, CO, EEUU*, 19–22.

Wischmeier, W. H., and D. D. Smith. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. USDA. Agriculture Handbook 537. Washington DC: US Government Printing Office.

Wösten, J.H.M., A. Lilly, A. Nemes, and C. Le Bas. 1998. *Using Existing Soil Data to Derive Hydraulic Parameters for Simulation Models in Environmental Studies and in Land Use Planning, Final Report on the European Union Funded Project*. Wageningen (The Netherlands): DLO Winand Staring Center.

Yakubov, M. 2012. "Assessing irrigation performance from the farmers' perspective: A qualitative study." *Irrigation and Drainage* 61 (3): 316–329.

Zahm, F., P. Girardin, C. Mouchet, P. Viaux, and L. Vilain. 2005. "De L'évaluation De La Durabilité Des Exploitations Agricoles à Partir De La Méthode IDEA à La Caractérisation De La Durabilité De La

‘Ferme Européenne’ à Partir d’IDERICA.” In Aix-en-Provence (France).

Annexes

Annexe 1 : Présentation des données collectées au cours des entretiens

Tableau 1 : Données collectées auprès des agriculteurs rencontrés dans le cadre des campagnes d'entretiens menées en 2012 et 2013 (par souci de confidentialité, les données sont volontairement anonymes) : exploitations

ID	Taille [ha]	Irrigation	Pompage [%]	Formation	Travail quotidien	Ouvriers	Statut foncier
1	400	Goutte-à-goutte	10	Supérieure	Ouvriers	Oui	Locataire
2	4.5	Gravitaire	20	Expérience	Exploitant	Non	Héritier
3	7.5	Goutte-à-goutte	100	Expérience	Ouvriers	Oui	Propriétaire
4	70	Goutte-à-goutte	90	Expérience	Ouvriers	Oui	Propriétaire
6	5	Gravitaire	20	Expérience	Exploitant	Famille	Propriétaire
7	4.5	Gravitaire	65	Expérience	Exploitant	Oui	Propriétaire
8	0.55	Gravitaire	0	Expérience	Exploitant	Non	Héritier
9	0.15	Gravitaire	0	Expérience	Exploitant	Non	Propriétaire
10	0.37	Gravitaire	50	Expérience	Gestionnaire	Non	Propriétaire
11	4	Goutte-à-goutte	100	Expérience	Exploitant	Non	Héritier
12	3.62	Gravitaire	60	Expérience	Exploitant	Famille	Propriétaire
13	4	Gravitaire	60	Expérience	Exploitant	Oui	Locataire
14	5.7	Gravitaire	60	Expérience	Gestionnaire	Oui	Propriétaire
15	3	Gravitaire	60	Expérience	Exploitant	Non	Propriétaire
17	4.12	Goutte-à-goutte	20	Expérience	Exploitant	Oui	Locataire
18	5.13	Goutte-à-goutte	100	Supérieure	Ouvriers	Oui	Héritier
20	10	Goutte-à-goutte	34	--	--	--	Propriétaire
21	4.29	Goutte-à-goutte	100	--	--	--	Héritier
22	1.45	Goutte-à-goutte	100	--	--	--	Héritier
23	4	Goutte-à-goutte	25	--	--	--	Propriétaire
24	5	Gravitaire	100	--	--	--	Héritier
25	3.5	Gravitaire	100	--	--	--	Héritier
26	4.03	Gravitaire	20	--	--	--	Propriétaire
27	4	Goutte-à-goutte	100	--	--	--	Héritier
28	4.2	Goutte-à-goutte	100	--	--	--	Héritier

Tableau 2 : Données collectées auprès des agriculteurs rencontrés dans le cadre des campagnes d'entretiens menées en 2012 et 2013 (par souci de confidentialité, les données sont volontairement anonymes) : parcelles

ID		Superficie	Culture[1]	Filière[2]	Irrigation[3]	Efficience[4]	ET relative[5]	Financiers [10^3 Dh/ha][6]		
exploitation/ parcelle		[ha]			[mm]	[%]		In	Out	Diff.
1	1	80.9	Agrumes	Export	374	99.7	0.54	22.5	16.1	6.4
1	2	25.3	Agrumes	Export	374	99.7	0.54	22.5	16.1	6.4
1	3	36.8	Agrumes	Export	374	99.7	0.54	22.5	16.1	6.4
1	4	28	Agrumes	Export	374	99.7	0.54	22.5	16.1	6.4
1	5	19.5	Agrumes	Export	374	99.7	0.54	22.5	16.1	6.4
1	6	8	Agrumes	Export	374	99.7	0.54	22.5	16.1	6.4
1	7	59.6	Agrumes	Export	374	99.7	0.54	22.5	16.1	6.4
1	8	91.1	Agrumes	Export	374	99.7	0.54	22.5	16.1	6.4
2	1	2	Agrumes	Export	1296	71.6	0.99	--	--	--
2	2	0.9	Agrumes	Export	1296	71.6	0.99	--	--	--
2	3	0.9	Agrumes	Export	1296	80.1	0.97	--	--	--
3	1	3.5	Agrumes	Export	3236	24.8	1.00	--	--	--
3	2	2	Agrumes	Export	3236	24.8	1.00	--	--	--
4	1	10.1	Maraichage	Local	216	99.3	0.68	50	50	0
4	2	8.6	Maraichage	Local	394	82.5	0.89	30	50	-20
4	3	4.7	Maraichage	Local	394	82.5	0.89	30	50	-20
4	5	22.6	Maraichage	Local	394	82.5	0.89	30	50	-20
6	1	1.6	Agrumes	Export	2407	38.8	1.00	25	12	13
6	2	1.2	Céréales	Local	135	99.3	0.48	--	--	--
6	3	1.9	Agrumes	Export	2407	40.2	1.00	25	12	13
7	1	1.5	Agrumes	Local	6221	16.9	1.00	80	40	40
8	1	0.55	Nèfles	Local	209	99.5	0.41	8.2	5	3.2
9	1	0.1	Nèfles	Export	1296	48.3	1.00	55	15	40
10	1	0.3	Nèfles	Local	450	98.7	0.80	30.3	7.5	22.8
11	1	1.7	Agrumes	Export	7704	14.2	1.00	30	27.5	2.5
11	2	1.8	Agrumes	Export	7704	12.5	1.00	30	27.5	2.5
12	1	1.8	Agrumes	Local	817	90.6	0.92	12.5	25	-12.5
12	2	1	Agrumes	Local	817	89.3	0.92	12.5	25	-12.5
12	3	0.4	Nèfles	Local	817	53.2	1.00	--	--	--
13	1	2.9	Agrumes	Local	1519	53.6	1.00	72	36	36
13	2	0.5	Maraichage	Local	1685	18.9	0.77	100	60	40
14	1	1.2	Agrumes	Local	1259	85.0	0.98	3	1.5	1.5
14	2	2.3	Agrumes	Local	1605	62.3	1.00	3	1.5	1.5
14	3	1.8	Céréales	Local	252	99.6	0.58	10	17.5	-7.5
15	1	1.5	Agrumes	Local	3215	33.1	0.99	20	33.3	-13.3
17	1	2	Agrumes	Export	941	88.9	1.00	11	6.5	4.5
17	2	1.4	Agrumes	Local	941	88.9	1.00	11	6.5	4.5
18	1	0.8	Maraichage	Local	3218	28.0	1.00	--	--	--

Tableau 2 (suite)

ID		Superficie	Culture[1]	Filière[2]	Irrigation[3]	Efficience[4]	ET relative[5]	Financiers [10^3 Dh/ha][6]		
exploitation/ parcelle		[ha]			[mm]	[%]		In	Out	Diff.
20	1	8.78	Agrumes	Export	3772	27.2	1.00	--	--	6
21	1	2.83	Agrumes	Export	4665	21.3	0.99	41.8	23.3	18.5
21	2	0.94	Agrumes	Export	4668	25.2	0.99	41.8	23.3	18.5
22	1	1.28	Agrumes	Export	5640	14.3	1.00	49.8	27.6	22.2
23	1	2.76	Agrumes	Export	781	99.9	0.94	42.9	16.7	26.2
23	2	0.34	Maraichage	Export	2075	20.7	0.98	--	--	--
23	3	0.4	Agrumes	Export	770	99.8	0.78	--	--	--
24	1	2.2	Agrumes	Export	5891	20.6	1.00	15.6	10	5.6
24	2	0.94	Céréales	Local	1164	30.7	0.73	11.2	5	6.2
24	3	0.55	Céréales	Local	3535	31.1	1.00	--	--	--
25	1	1.57	Agrumes	Export	2412	48.3	1.00	15	6.1	8.9
25	2	0.58	Agrumes	Export	1701	56.9	1.00	--	--	--
25	3	0.59	Agrumes	Export	1704	52.2	1.00	--	--	--
25	4	0.44	Céréales	Local	71	97.6	0.39	--	--	--
26	1	2.99	Agrumes	Export	732	99.8	0.87	--	--	--
26	2	0.64	Maraichage	Local	732	72.2	0.60	--	--	--
27	1	3.51	Agrumes	Export	2297	42.1	0.95	54.6	30	24.6
28	1	3.36	Agrumes	Export	1714	59.5	0.97	85.7	28.5	57.2

[1] 'Maraichage' rassemble les cultures de pommes de terre, de betteraves et de tomates.

[2] 'Export' signifie que la production est vendue à une société de conditionnement, 'Local' signifie que la production est écoulée localement par une filière courte ou consommée au sein de l'exploitation.

[3] Données reconstituées sur base des explications des agriculteurs quant à leurs pratiques d'irrigation.

[4] Calculée sur base de la méthodologie présentée à la section 3.1.

[5] Calculée sur base de la méthodologie présentée à la section 3.1

[6] Rentrées financières déclarées par l'agriculteur (In), dépenses déclarées par l'agriculteur (Out), bilan financier déclaré par l'agriculteur (Diff. = In-Out).

Annexe 2 : Equations de pédotransfert

Pour calculer l'efficience de l'irrigation η à l'échelle de la parcelle (chapitre 3.1), les propriétés hydrodynamiques du sol sont déterminées en utilisant les équations de Mualem-Van Genuchten (van Genuchten 1980). Le lien entre la teneur en eau du sol θ et la succion h est obtenu en combinant les équations 1 et 2 tandis que la conductivité hydraulique du sol $K(h)$ est obtenue en utilisant l'équation 3 (Weynants 2011).

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \textbf{(1)}$$

$$S = (1 + (\alpha|h|)^n)^{-m} \quad \textbf{(2)}$$

$$K(h) = K_0 \left[S^{\lambda} \left(1 - \left(1 - S^{n/n-1} \right)^{1-1/n} \right)^2 \right] \quad \textbf{(3)}$$

avec S le taux de saturation [-], θ la teneur en eau volumique [-], θ_r la teneur en eau résiduelle [-], θ_s la teneur en eau à saturation, h le potentiel matriciel [cm], $K(h)$ la conductivité hydraulique du sol [cm.j^{-1}] et K_0 la conductivité hydraulique à h=0 cm [cm.j^{-1}]. Les paramètres λ, qui prend en compte la tortuosité et la connectivité du réseau de pores, α, n et m sont des paramètres de formes.

Le paramètre m est supposé égal à $1\text{-}1/n$. La détermination des valeurs des paramètres λ, α et n ainsi que de θ_s, θ_r et K_0 est réalisée sur base d'équations de pédotransfert, qui permettent d'estimer le comportement hydrodynamique d'un sol à partir de ses propriétés granulométriques principalement. En raison de l'incertitude associée à l'utilisation de telles équations, plusieurs fonctions de pédotransfert différentes ont été utilisées. Les résultats obtenus pour ces différentes fonctions ont ensuite été moyennés afin d'obtenir une valeur unique pour chaque horizon.

Les fonctions de pédotransfert utilisées sont les fonctions Hypres (Wösten et al. 1998), Rosetta (Schaap et al. 2001) et celles décrites par Weynants et al. (2009). Elles sont ici rapidement présentées.

Hypres

Les équations de pédotransfert dites Hypres (Wösten et al. 1998) permettent de calculer les paramètres θ_s, α, n, λ et K_{sat} (la conductivité à saturation) (équations 5 à 9). La valeur de θ_r est supposée constante et égale à 0.1 (équation 4) et la valeur de K_0 est supposée égale à K_{sat}.

$$\theta_r = 0.1 \quad \textbf{(4)}$$

$$\begin{aligned}\theta_s = {} & 0.7919 + 0.001691 \cdot C - 0.29619 \cdot D - 0.000001491 \cdot S^2 \\ & + 0.0000821 \cdot OM^2 + 0.02427 \cdot C^{-1} + 0.01113 \\ & \cdot S^{-1} + 0.01472 \cdot \ln(S) - 0.0000733 \cdot OM \cdot C \\ & - 0.000619 \cdot D \cdot C - 0.001183 \cdot D \cdot OM \\ & - 0.0001664 \cdot topsoil \cdot S\end{aligned} \quad \textbf{(5)}$$

$$\begin{aligned}\propto^* = {} & -14.96 + 0.03135 \cdot C + 0.0351 \cdot S + 0.646 \cdot OM + 15.29 \cdot D \\ & - 0.192 \cdot topsoil - 4.671 \cdot D^2 - 0.000781 \cdot C^2 \\ & - 0.00687 \cdot OM^2 + 0.0449 \cdot OM^{-1} + 0.0663 \\ & \cdot \ln(S) + 0.1482 \cdot \ln(OM) - 0.04546 \cdot D \cdot S \\ & - 0.4852 \cdot D \cdot OM + 0.00673 \cdot topsoil \cdot C\end{aligned} \quad \textbf{(6)}$$

$$\begin{aligned}n^* = {} & -25.23 - 0.02195 \cdot C + 0.0074 \cdot S - 0.1940 \cdot OM + 45.5 \cdot D \\ & - 7.24 \cdot D^2 + 0.0003658 \cdot C^2 + 0.002885 \cdot OM^2 \\ & - 12.81 \cdot D^{-1} - 0.1524 \cdot S^{-1} - 0.01958 \cdot OM^{-1} \\ & - 0.2876 \cdot \ln(S) - 0.0709 \cdot \ln(OM) - 44.6 \\ & \cdot \ln(D) - 0.02264 \cdot D \cdot C + 0.0896 \cdot D \cdot OM \\ & + 0.00718 \cdot topsoil \cdot C\end{aligned} \quad \textbf{(7)}$$

$$\begin{aligned}\lambda^* = {} & 0.0202 + 0.0006193 \cdot C^2 - 0.001136 \cdot OM^2 - 0.2316 \\ & \cdot \ln(OM) - 0.03544 \cdot D \cdot C + 0.00283 \cdot D \cdot S \\ & + 0.0488 \cdot D \cdot OM\end{aligned} \quad \textbf{(8)}$$

$$\begin{aligned}K_{sat}^* = {} & 7.755 + 0.0352 \cdot S + 0.93 \cdot topsoil - 0.967 \cdot D^2 \\ & - 0.000484 \cdot C^2 - 0.000322 \cdot S^2 + 0.001 \cdot S^{-1} \\ & - 0.0748 \cdot OM^{-1} - 0.643 \cdot \ln(S) - 0.01398 \cdot D \\ & \cdot C - 0.1673 \cdot D \cdot OM + 0.02986 \cdot topsoil \cdot C \\ & - 0.03305 \cdot topsoil \cdot S\end{aligned} \quad \textbf{(9)}$$

avec $K_{sat}^*=ln(K_{sat})$, $\alpha^*=ln(\alpha)$, $n^*=ln(n-1)$ et $\lambda^*=ln((\lambda+10)/(10-\lambda))$, *C* est le pourcentage d'argile [%] (i.e. pourcentage dont la granulométrie < 2µm), *S* est le pourcentage de limon [%] (i.e. pourcentage donc la granulométrie va de 2 à 50 µm), *OM* est la teneur en matière organique [%], *D* est la densité apparente [g/cm³] et *topsoil* est une variable qualitative (1 pour la couche de surface).

Weynants et al.

Les équations de pédotransfert décrites par Weynants et al. (2009) permettent de calculer les paramètres θ_s, α, n, λ et K_{sat} (équations 11 à 15). La valeur de θ_r est supposée constante et égale à 0 (équation 10).

$$\theta_r = 0 \quad \textbf{(10)}$$

$$\theta_s = 0.6355 + 0.0013 \cdot clay - 0.1631 \cdot BD \quad \textbf{(11)}$$

$$\alpha^* = -4.3003 - 0.0097 \cdot clay + 0.0138 \cdot sand - 0.0992 \cdot OC \quad \textbf{(12)}$$

$$n^* = -1.0846 - 0.0236 \cdot clay - 0.0085 \cdot sand + 0.0001 \cdot sand^2 \quad \textbf{(13)}$$

$$K^* = 1.9582 + 0.0308 \cdot sand - 0.06142 \cdot BD - 0.1566 \cdot OC \quad \textbf{(14)}$$

$$\lambda = -1.8642 - 0.1317 \cdot clay + 0.0067 \cdot sand \quad \textbf{(15)}$$

avec $K^*=ln(K_0)$, $\alpha^*=ln(\alpha)$ et $n^*=ln(n-1)$, *clay* est le pourcentage d'argile [%] (i.e. pourcentage dont la granulométrie < 2µm), *sand* est le pourcentage de sable [%] (i.e. pourcentage donc la granulométrie est supérieure à 50 µm), *OC* est la teneur en carbone organique [%] et *BD* est la densité apparente [g/cm³], obtenue à partir de l'équation 16 (Bollen et al. 1995). *OC* est supposée égale à *MO/2* (Pribyl 2010), avec *MO* le pourcentage de matière organique [%].

$$BD = 1.8 + 1.236\frac{MO}{100} - 1.91\sqrt{\frac{MO}{100}} \quad \textbf{(16)}$$

Rosetta

Rosetta est un programme informatique qui, en utilisant cinq fonctions de pédotransfert, permet l'estimation des paramètres de l'équation de van Genuchten (équations 1 à 3). Cette estimation est possible sur base de diverses données, le cas de figure le plus simple étant les classes texturales uniquement. Si plus d'informations sont disponibles, cette estimation est possible sur base des classes texturales, de la densité apparente et de l'un ou l'autre point de la courbe de rétention (Schaap et al. 2001).

Ce programme est basé sur un réseau de neurone et les équations qui y sont implémentées ne peuvent donc être ici décrites. Le programme peut être téléchargé depuis le site du *US Salinity Laboratory*.

Résultats

L'implémentation de ces fonctions de pédotransfert pour les sols squelettiques peu profonds et pour les sols steppiques est basée sur les analyses granulométriques réalisées par de Chevron-Villette (1956). La granulométrie moyenne des sols est renseignée au tableau 1. Les valeurs moyennes des paramètres de l'équation de van Genuchten (équations 1 à 3) mesurés à partir de ces valeurs sont présentés au tableau 2.

Tableau 2 : Granulométrie et teneur en matière organique des sols du CMV103 : valeurs moyennes et écarts types (source : de Chevron-Villette (1956)). Ces valeurs sont les valeurs moyennes sur l'épaisseur considérée.

	Epaisseur considérée [cm]	Sable [%] (moyenne ± écart type)	Argile [%] (moyenne ± écart type)	Matière organique [%] (moyenne ± écart type)
Sols squelettiques	140	49.7 ± 9.7	24.9 ± 7.8	0.56 ± 0.17
	110	48.5 ± 9.6	26.0 ± 8.4	0.68 ± 0.18
	75	47.7 ± 7.8	26.1 ± 7.2	0.88 ± 0.23
	50	48.0 ± 5.6	25.6 ± 5.9	1.13 ± 0.28
Sols steppiques	140	38.2 ± 7.5	39.1 ± 9.1	0.44 ± 0.17
	110	38.1 ± 6.7	39.2 ± 8.5	0.53 ± 0.20
	75	38.5 ± 6.1	38.3 ± 8.2	0.67 ± 0.24
	50	40.1 ± 6.1	35.9 ± 8.0	0.83 ± 0.28

Tableau 3 : Valeurs des paramètres de van Genuchten obtenues à partir des équations de pédotransfert : valeurs moyennes ± écarts types. Ces valeurs sont les valeurs moyennes sur l'épaisseur considérée.

	Epaisseur considérée [cm]	K_0 [cm.j^{-1}]	θ_r [%]	θ_s [%]	λ	n	α
Sols squelettiques	140	20.1 ± 17.6	5.5 ± 5.8	39.6 ± 2.7	-2.2 ± 4.5	1.23 ± 0.12	0.032 ± 0.023
	110	19.9 ± 19.0	5.7 ± 5.7	40.2 ± 2.7	-2.2 ± 4.5	1.23 ± 0.13	0.031 ± 0.022
	75	20.6 ± 19.4	5.7 ±5.9	40.7 ± 2.8	-2.3 ± 4.3	1.23 ± 0.13	0.030 ± 0.020
	50	21.7 ± 20.2	5.6 ± 5.9	41.1 ± 2.6	-2.3 ± 4.3	1.23 ± 0.13	0.030 ± 0.018
Sols steppiques	140	13.7 ± 13.8	6.1 ± 6.0	41.1 ± 3.4	-3.3 ± 4.5	1.17 ± 0.10	0.029 ± 0.022
	110	13.8 ± 14.2	6.1 ± 6.0	41.5 ± 3.3	-3.3 ± 4.4	1.17 ± 0.11	0.029 ± 0.021
	75	15.7 ± 16.4	6.1 ± 6.0	41.7 ± 3.2	-3.2 ± 4.4	1.18 ± 0.11	0.029 ± 0.020
	50	16.4 ± 17.8	6.1 ± 5.9	41.7 ± 3.0	-3.3 ± 4.4	1.19 ± 0.11	0.029 ± 0.020

Bibliographie

Bollen, M.J. S., F.H. W. M. Bekhuis, R. Reiling, and E. Scheper. 1995. "Toward a Spatial Pattern of the Vulnerability of Soil and Groundwater". RIVM Report n° 711901012.

de Chevron-Villette, A. 1956. *Notes Sur Les Sols Des Triffa*. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer - Genie Rural Maroc.

van Genuchten, M.T. 1980. "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils." *Soil Science Society of America Journal* 44 (5): 892–898.

Pribyl, Douglas W. 2010. "A Critical Review of the Conventional {SOC} to {SOM} Conversion Factor." *Geoderma* 156 (3–4): 75 – 83.

Schaap, M. G., F. J. Leij, and M. T. van Genuchten. 2001. "Rosetta: A Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions." *Journal of Hydrology* 251 (3): 163–176.

Weynants, M. 2011. "Linking Soil Hydraulic Properties to Structure Indicators : Experiments and Modelling". Louvain-la-Neuve, Belgique: Université catholique de Louvain.

Weynants, M., H. Vereecken, and M. Javaux. 2009. "Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions: Introducing a Closed-form Hydraulic Model." *Vadose Zone Journal* 8 (1): 86–95.

Wösten, J.H.M., A. Lilly, A. Nemes, and C. Le Bas. 1998. *Using Existing Soil Data to Derive Hydraulic Parameters for Simulation Models in Environmental Studies and in Land Use Planning, Final Report on the European Union Funded Project*. Wageningen (The Netherlands): DLO Winand Staring Center.

Annexe 3 : Fondements théoriques de l'approche *ESR*

Généralités

L'approche *ESR* (*endogenous switching regression*) utilisée aux chapitres 3 et 4 de ce document n'est que rarement utilisée. Cette annexe présente donc les clés pour comprendre cette méthode. Les fondements détaillés des méthodes de régression *switching* sont présentés par Wooldridge (2002). La présente synthèse s'appuie principalement sur les travaux de Xie (2000) et de Lokshin and Sajaia (2004).

Soient *i* individus qui peuvent ou non adopter un traitement donné, $w=1$ lorsque le traitement est adopté et $w=0$ dans le cas contraire. Le bénéfice des individus *i* est appelé Y_i et diverses variables observées pour les individus *i* sont rassemblées dans le vecteur Z_i. Afin d'observer l'effet de l'adoption du traitement sur le bénéfice *Y*, la statistique classique comparerait le revenu $y_0=E(y|w=0)$ des individus n'ayant pas adopté le traitement au bénéfice $y_1=E(y|w=1)$ des individus l'ayant adopté. Les théories visant à mesurer l'effet d'un traitement (*Average treatment Effect ATE*) recommandent toutefois d'inclure la variabilité des variables observées dans l'analyse, ce qui amène à comparer $y_0=E(y|w=0,Z)$ et $y_1=E(y|w=1,Z)$.

Une approche de ce type repose toutefois sur un nombre très important d'hypothèses, l'une d'elle étant que les échantillons soient effectivement comparables. En effet, un certain nombre de variables non-observées peuvent influencer le choix de l'adoption du traitement. Les deux groupes d'individus ne sont alors plus comparables en tant que tels. Cet état de fait est généralement appelé *biais de sélection*.

En travaillant avec un échantillon aléatoire, l'adoption du traitement n'est en effet pas contrôlée. Il est dès lors probable que les individus ayant adopté le traitement l'aient fait car le bénéfice associé à cette adoption est pour eux particulièrement important, supérieur au bénéfice que tirerait de ce traitement la moyenne de la population. A l'inverse, la non-adoption du traitement par d'autres individus pourrait s'expliquer par le bénéfice particulièrement faible qu'ils tireraient de cette adoption. La participation au traitement serait alors endogène puisqu'influencée par le revenu qui est tiré de cette adoption. Cette endogénéité doit être correctement appréhendée.

L'*ESR*

Les méthodes *ESR* permettent de représenter cette endogénéité. Pour ce faire, la première étape consiste à représenter l'adhésion au traitement. Sous l'hypothèse que chaque individu a une tendance latente à adopter le traitement Z_i^*, avec un seuil de décision arbitrairement fixé à 0, la probabilité d'adoption du traitement d'un individu *i* $P(w_i=1)=P(W_i^*>0)$. Cette tendance latente peut, pour un individu *i*, être exprimée comme une fonction linéaire des variables observées Z_i (équation 1).

$$W_i^* = \sum_k g_k Z_{ik} + u_i \quad \textbf{(1)}$$

avec *k* le nombre de variables dans le vecteur X_i, *g* un vecteur de paramètres et u_i la partie de W_i^* inexpliquée par les variables de X_i. Le revenu hypothétique de cet individu peut être exprimé par l'équation 2 selon que le traitement soit ou non adopté.

$$\begin{aligned} y_{0i} &= \sum_k b_{0k} Z_{ik} + e_{0i} \\ y_{1i} &= \sum_k b_{1k} Z_{ik} + e_{1i} \end{aligned} \quad \textbf{(2)}$$

avec e_{0i} et e_{1i} les parties de y_0 et y_1 inexpliquées par les variables de Z_i et b_0 et b_1 deux vecteurs de paramètres. Le bénéfice associé à l'adoption du traitement pour l'individu *i* pourrait donc être estimé par $E(y_{1i})-E(y_{0i})$. Toutefois, seule une de ces deux valeurs peut être observée pour chaque individu, l'autre valeur étant purement hypothétique. L'étude classique de l'effet de l'adoption du traitement (*Average Treatment Effect ATE*) requiert la connaissance de ces deux valeurs. La méthode ici présentée consiste à représenter, en utilisant un modèle statistique, cette seconde valeur inobservable puisqu'hypothétique. La comparaison des coefficients b_0 et b_1 de l'équation 2 conduit ainsi à l'effet du traitement conditionnel aux variables observées *Z*.

Pour estimer les vecteurs de paramètres, il est nécessaire de définir au préalable la structure des parties inexpliquées *u*, e_0 et e_1. La forme de leur distribution est donc prédéfinie, généralement par des distributions normales centrées en 0. Le modèle peut alors être formulé sous sa forme générale (équations 3 et 4). L'estimation des paramètres *g*, b_0 et b_1 et des parties

inexpliquées u, e_0 et e_1, communs à l'ensemble de la population, est réalisée en optimisant le maximum de vraisemblance.

$$\begin{aligned} y_1 \text{ observé si} \quad & Zg + u > 0 \\ y_0 \text{ observé si} \quad & Zg + u \leq 0 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} y_1 &= Z \cdot b_1 + e_1 \\ y_0 &= Z \cdot b_0 + e_0 \end{aligned} \tag{4}$$

Bien que le modèle, tel qu'ici présenté, soit théoriquement identifiable, l'information d'identification est très faible et les estimateurs sont souvent instables. Pour améliorer cette identifiabilité, il est utile d'exclure un certain nombre de variables indépendantes de certaines des équations. Ces variables sont généralement exclues des équations de régression et elles ne sont donc utilisées que dans l'équation de sélection. La structure du modèle prend alors sa forme définitive (équations 5 et 6).

$$\begin{aligned} y_1 \text{ observé si} \quad & Zg + u > 0 \\ y_0 \text{ observé si} \quad & Zg + u \leq 0 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} y_1 &= X \cdot b_1 + e_1 \\ y_0 &= X \cdot b_0 + e_0 \end{aligned} \tag{6}$$

où X est un vecteur de variables observées correspondant au vecteur Z duquel certaines variables ont été retirées.

Avec l'approche *ESR*, la sélectivité peut directement être analysée sur base de l'estimation des termes de covariance. Si l'adoption du traitement *w* est bénéfique, la covariance attendue entre les termes *u* et e_1 $\rho_1=corr(u,e_1)$ sera positive, et *vice versa*. S'il y a un bénéfice à ne pas adopter le traitement *w*, la covariance entre les termes *u* et e_0 $\rho_0=corr(u,e_0)$ sera négative. En d'autres termes, si $\rho_1>0$ et que $\rho 0<0$, l'individu ayant adopté le traitement *w* tire plus de bénéfices de cette adoption que la moyenne de la population et l'individu qui n'adopte pas le traitement *w* bénéficie plus de cette non-adoption que la moyenne. Un tel cas est une sérieuse preuve de *biais de sélection*.

Si $\rho_1<0$ et que $\rho_0>0$, l'adoption fonctionne exactement à l'inverse. Dans les autres cas (si les deux covariances sont simultanément soit positives soit négatives), la sélectivité n'est pas spécifique au régime et le *biais de sélection* est alors moindre. L'interprétation des termes de covariance est donc une des clés de l'interprétation des résultats de l'approche *ESR*.

Références

Lokshin, Michael, and Zurab Sajaia. 2004. "Maximum Likelihood Estimation of Endogenous Switching Regression Models." *The Stata Journal* 4 (3): 282–89.

Wooldridge, J. M. 2002. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts.

Xie, Y. 2000. "Endogenous Switching Regression Models." In *Into Adulthood: A Study of the Effect of Head Start*. Ypsilanti, MI: High/Scope Press.

Annexe 4 : Calcul des indicateurs utilisés au chapitre 4

Les indicateurs utilisés pour mesurer la performance de l'irrigation, du point de vue de l'agriculteur, dans le contexte de la transition de l'irrigation gravitaire à l'irrigation goutte-à-goutte dans le CMV103 de la plaine des Triffa sont présentés au tableau 17 du chapitre 4. La formule utilisée y est également synthétisée. Cette annexe reprend point par point la méthode de calcul de ces indicateurs et les hypothèses qui y sont liées.

Tous les indicateurs sont calculés à l'échelle de l'exploitation, à l'exception des indicateurs 2 (stress hydrique) et 3 (niveau de la nappe). Chaque indicateur est calculé pour chaque exploitation. Sauf mention contraire, tous les termes utilisés dans les équations concernent donc l'ensemble de l'exploitation et l'équation est appliquée pour chaque exploitation.

1. Pratiques d'irrigation

Dans le cadre SAFE, cet indicateur est un indicateur binaire, selon que l'agriculteur pratique ou non l'irrigation. Dans le cadre du périmètre irrigué de la plaine des Triffa, cet indicateur a été adapté en *pourcentage de terres irriguées* afin de lui apporter plus de nuances.

La formule définitive est la suivante (équation 1).

$$indicateur\ 1 = 100 \cdot \frac{\sum S_{p_i}}{S_{ferme}} \quad \textbf{(1)}$$

avec ΣS_{p_i} la somme de la superficie des parcelles irriguées au sein de l'exploitation et S_{ferme} la taille officielle de l'exploitation telle que renseignée dans le recensement réalisé par l'ORMVAM en 2012.

2. Stress hydrique

Cet indicateur est calculé à l'échelle de la parcelle. En effet, les pratiques, au sein d'une exploitation, varient d'une parcelle à l'autre, principalement selon la culture.

Le calcul de cet indicateur est réalisé sur base des résultats du bilan hydrique réalisé à l'échelle parcellaire présenté en détail au chapitre 3. Ce bilan est réalisé au pas de temps hebdomadaire. Dans le cadre SAFE, l'indicateur est exprimé en nombre de jours de stress par an. Ici, il est donc exprimé en nombre de semaines de stress par an.

Ce nombre est déterminé en comptant le nombre de semaines par an où le coefficient de stress hydrique K_s est inférieur à 1.

3. Niveau de la nappe

Cet indicateur est impossible à représenter à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation. Aucune valeur individuelle n'est donnée pour cet indicateur mais l'effet de la technique d'irrigation sur le niveau de la nappe, tel que discuté au chapitre 3, a été intégré à la discussion sur les performances de l'irrigation.

4. Consommation d'eau de la nappe

Cet indicateur est calculé à l'échelle de l'exploitation. La consommation totale annuelle d'eau d'irrigation est calculée sur base du bilan hydrique réalisé à l'échelle parcellaire au chapitre 3. Le pourcentage de ce total provenant de la nappe est estimé, de manière individuelle pour chaque exploitation, sur base des entretiens réalisés avec les responsables de ces exploitations en 2012 ou 2013. La consommation d'eau depuis la nappe est obtenue en multipliant l'irrigation totale par ce pourcentage.

5. Production énergétique

Dans aucune des exploitations rencontrées, une quelconque production énergétique ne fut ni mentionnée ni observée. Cette valeur est donc égale à 0 pour toutes les exploitations.

6. Consommation énergétique

La consommation d'énergie totale de l'exploitation est une donnée qui n'est pas disponible. La consommation d'énergie nécessaire à l'irrigation n'est, elle non plus, pas disponible mais peut être estimée moyennant un certain nombre d'hypothèses. Cette option fut donc retenue afin de permettre l'estimation de la valeur de cet indicateur.

Par hypothèse, le calcul se limite ici à la consommation énergétique utilisée pour appliquer l'eau d'irrigation. L'énergie nécessaire au travail de la parcelle, par exemple, n'est pas comptabilisée. Cette estimation n'intègre que l'énergie requise par le pompage depuis la nappe, lorsque l'eau est pompée, et par la mise sous pression, lorsque l'irrigation goutte-à-goutte est pratiquée.

Enfin, la consommation énergétique est, dans le cadre SAFE, exprimée en GJ/ha. Cette consommation est ici directement transformée en

consommation d'essence et est donc exprimée en litres d'essence par hectare.

Travail nécessaire au pompage

L'hypothèse d'une profondeur constante de la nappe est posée. Cette profondeur est fixée à 16.8 m, ce qui correspond à la profondeur moyenne pour la période 1994-1999 au niveau du CMV103. Le travail nécessaire au pompage est calculé, pour chaque parcelle, par l'équation 2.

$$W_{pompage} = \Delta z_{nappe} \cdot g \cdot \rho_{eau} \cdot I_{gw} \quad \textbf{(2)}$$

avec $W_{pompage}$ le travail annuel nécessaire au pompage [J], Δz_{nappe} la profondeur de la nappe [m], g la constante de pesanteur (9.81 $m.s^{-2}$), ρ_{eau} la masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3) et I_{gw} le volume annuel pompé [m^3] tel que calculé pour l'indicateur 4.

Travail nécessaire à la mise sous pression

L'hypothèse est posée que tous les agriculteurs pratiquant l'irrigation goutte-à-goutte appliquent la même pression, arbitrairement fixée à 2.5 bars. Les agriculteurs pratiquant l'irrigation gravitaire ne mettent pas l'eau sous pression et le travail ici nécessaire est donc nul pour ces exploitations.
Le travail nécessaire à la mise sous pression est calculé, pour chaque parcelle, par l'équation 3.

$$W_{pression} = \frac{P_{gag}}{\rho_{eau}} \cdot \rho_{eau} \cdot I_{tot} \quad \textbf{(3)}$$

avec $W_{pression}$ le travail annuel nécessaire à la mise sous pression [J], P_{gag} la pression nécessaire à l'irrigation goutte-à-goutte [Pa] (250000 Pa) et I_{tot} le volume total annuel irrigué [m^3] calculé sur base des entretiens réalisés en 2012 et 2013.

Consommation d'énergie

Le travail total requis pour l'irrigation W_{tot} est calculé pour chaque exploitation en faisant la somme du travail requis pour le pompage depuis la nappe et pour la mise sous pression pour les différentes parcelles de l'exploitation (équation 4).

$$W_{tot} = \sum W_{pression} + W_{pompage} \quad \textbf{(4)}$$

Pour convertir ce travail en consommation d'énergie, l'hypothèse est posée que les agriculteurs utilisent une pompe à essence et des valeurs de rendements mécanique et moteur standards sont utilisées. Ce travail est alors transformé en litres d'essence à partir de valeurs standard de capacité calorifique et de masse volumique de l'essence (équation 5).

$$C_{essence} = \frac{W_{tot}}{e_{méca} \cdot e_{moteur}} \cdot \frac{1}{cc_{essence} \cdot \rho_{essence}} \quad \textbf{(5)}$$

avec $C_{essence}$ la consommation annuelle d'essence de l'exploitation [l], e_{meca} le rendement mécanique moyen d'une pompe [-] estimé à 0.5, e_{moteur} le rendement thermique moyen des moteurs à essence [-] estimé à 0.25, $cc_{essence}$ la capacité calorifique de l'essence ($47.3 \ . \ 10^6$ J/kg) et $\rho_{essence}$ la masse volumique de l'essence (0.75 kg/l). Cette valeur est finalement divisée par la somme de la superficie des parcelles irriguées pour l'exprimer en litres d'essence par hectare.

7. Consommation d'énergie renouvelable

Dans aucune des exploitations rencontrées, une quelconque consommation d'énergie renouvelable ne fut ni mentionnée ni observée. Cette valeur est donc égale à 0 pour toutes les exploitations.

8. Bilan énergétique

Le calcul du bilan énergétique est défini comme la différence entre l'énergie produite et l'énergie consommée. L'énergie produite étant nulle pour toutes les exploitations, la valeur de cet indicateur est donc égale à la valeur de l'indicateur 6 (consommation d'énergie).

9. Nombre d'espèces cultivées

La valeur est ici définie comme le nombre total d'espèces différentes effectivement cultivées sur les parcelles agricoles. Les cultures pratiquées pour un potager n'interviennent donc pas dans ce calcul. Les critères sont donc avant tout un critère spatial, toutes les espèces cultivées sur les parcelles agricoles sont intégrées, et un critère de gestion, les espèces effectivement cultivées sont seules prises en compte (par exemple, la présence d'adventices régulièrement éliminées n'est pas comptabilisée mais la présence de fourrage récolté l'est).

Les parcelles irriguées et les parcelles cultivées mais non irriguées sont prises en compte, de même qu'une éventuelle exploitation de l'espace entre

les rangs d'agrumes pour pratiquer des cultures maraichères. La présence d'éventuelles cultures non-commercialisées est également intégrée dans le calcul.

10. Revenu

Le revenu des agriculteurs est exprimé en Dh/ha. Il se limite aux revenus tirés de la vente de leur production agricole. Il est défini comme la différence entre les rentrées financières tirées de la vente de la production agricole et les investissements nécessaires à cette production.

L'estimation de cette valeur est basée sur les déclarations des agriculteurs rencontrés dans le cadre des entretiens menés en 2012 et 2013. Certains agriculteurs n'ont pas divulgué ces informations. Cet indicateur n'est donc quantifié que pour 40 de 60 parcelles caractérisées pour les autres indicateurs.

Les investissements n'intègrent que les couts variables : cout de l'énergie, des intrants, de la main d'œuvre, etc. Les investissements à long terme, typiquement le cout d'achat ou de location du terrain et du matériel d'irrigation, ne sont pas disponibles et ne sont donc pas intégrés dans cette estimation.

Les revenus totaux sont calculés pour l'exploitation [Dh] puis exprimés en Dh/ha sur base de la superficie officielle de l'exploitation telle que renseignée dans le recensement réalisé par l'ORMVAM en 2012.

11. Productivité financière

La productivité financière est définie comme le rapport entre les rentrées financières tirées de la vente de la production agricole et les investissements nécessaires à cette production. Elle exprime donc le revenu généré par dirham investi. L'estimation de cet indicateur est réalisée à partir des données utilisées pour calculer l'indicateur 10 (revenu).

12. Sources de revenu

Cet indicateur liste le nombre de sources de revenu différentes au sein d'une exploitation.

Chaque culture pratiquée est considérée comme une source de revenu, y compris les cultures non-commercialisées, comme les céréales et les fourrages. A cette liste s'ajoutent d'autres sources de revenu éventuellement mentionnées ou observées. Elles peuvent être liées à l'activité agricole (bétail, location de matériel ou de services agricoles, etc.) ou complètement indépendante de cette activité (activité professionnelle complémentaire…).

13. Pérennité du statut foncier

Cet indicateur remplace l'indicateur *existence d'une nouvelle génération repreneuse* du cadre SAFE. Cet indicateur vise à évaluer la *garantie de la continuité intergénérationnelle des activités agricoles*. Dans la zone d'étude, cette continuité est principalement entravée par les questions foncières et cet indicateur est donc plus approprié.

La stabilité foncière est évaluée sur une échelle de 1 à 3. La situation la moins stable prend la valeur de 1 : il s'agit d'agriculteurs actuellement en conflit par rapport au statut foncier, principalement parce que des conflits d'héritages existent et que plusieurs ayant droit se disputent le droit d'exploiter la terre. La situation intermédiaire prend une valeur de 2 : il s'agit d'exploitants louant leur terre, souvent à l'état et pour une très longue durée (certains baux peuvent avoir une durée de 100 ans). La valeur de 3 est attribuée aux agriculteurs étant pleinement propriétaires de leur exploitation.

14. Diversité des types de nourriture

Cet indicateur, à visée sociale, est défini comme le nombre de cultures commercialisées. Cet indicateur reprend donc les cultures cultivées qui sont effectivement commercialisées, soit via une filière industrielle soit directement au souk, le marché local.

La valeur de cet indicateur sera donc toujours inférieure ou égale à celle de l'indicateur 9 (nombre d'espèces cultivées). Les principales cultures cultivées (et donc intégrées dans l'indicateur 9) mais non commercialisées (et donc non comptabilisées ici) sont les cultures de céréales et les cultures fourragères, toutes deux étant destinées à être consommées au sein de l'exploitation.

15. Pourcentage de superficie effectivement irrigué

Cet indicateur vise à évaluer le critère *gestion d'une superficie agricole adéquate*, critère pour lequel aucun indicateur n'est mentionné dans le cadre SAFE. Sur base de la revue bibliographique présentée au chapitre 4.2, cet indicateur est un des plus couramment utilisé pour évaluer la performance de l'irrigation et fut donc ici sélectionné.

Son calcul correspond toutefois exactement à celui de l'indicateur 1 et leurs valeurs sont donc rigoureusement identiques.

16. Emploi de travailleurs pour le travail agricole quotidien

Cet indicateur vise à évaluer le critère *conditions de travail optimales*, pour lequel l'indicateur proposé par le cadre SAFE fut exclu par manque de

données. Sur base de la revue bibliographique mentionnée au chapitre 4.2, la question de l'emploi est un des critères d'évaluation très fréquemment évoqué pour évaluer les performances sociales de l'irrigation. Les données relatives à cette problématique sont par contre rarement disponibles et un tel indicateur est donc rarement quantifié.
Aucune formule précise ne fut donc trouvée sur base de la revue bibliographique. Un indicateur composite fut donc constitué sur base des données disponibles suite aux entretiens menés en 2012 et 2013.
Deux types de données sont disponibles par rapport à la question de l'emploi chez les agriculteurs rencontrés : la personne responsable du travail quotidien et le statut des personnes effectuant concrètement ce travail quotidien, de manière qualitative. Une valeur de 1 à 3 est attribuée selon la personne responsable du travail quotidien : 1 lorsque le propriétaire (ou le gestionnaire de la société) lui-même est responsable du travail, 2 lorsque qu'un gestionnaire engagé par ce propriétaire est responsable de ce travail et 3 lorsqu'une équipe d'ouvrier est responsable du travail. Une valeur de 0 à 2 est par ailleurs attribuée selon le statut des personnes effectuant concrètement le travail quotidien : 0 lorsque l'exploitant responsable effectue seul les travaux quotidiens, 1 lorsque l'exploitant est aidé par des membres de sa famille pour effectuer les travaux quotidiens et 2 lorsque des ouvriers sont engagés à long terme pour effectuer ces travaux quotidiens (les ouvriers engagés ponctuellement ne sont pas comptabilisés).
L'indicateur final est la somme de ces deux valeurs et prend donc une valeur allant de 1 à 5.

17. Niveau de formation du gestionnaire

Cet indicateur vise à évaluer le critère *éducation des travailleurs agricoles*, pour lequel l'indicateur proposé par le cadre SAFE n'est pas adapté à la zone d'étude.
La détermination de cet indicateur est basée sur les déclarations des agriculteurs rencontrés dans le cadre des entretiens menés en 2012 et 2013. Une valeur de 1 à 3 est attribuée en fonction du niveau de formation de l'exploitant, défini comme la personne responsable des décisions relatives à la gestion quotidienne de l'exploitation. Une valeur de 1 est attribuée lorsque cet exploitant n'a aucune formation particulière (ses connaissances sont alors souvent basées sur « l'expérience », le plus souvent dans l'exploitation parentale), une valeur de 2 est attribuée lorsque l'exploitant a une formation technique inférieure (niveau « collège technique ») et une valeur de 3 est

attribuée lorsque l'exploitant a une formation technique supérieure (études supérieures agricoles, quel qu'en soit le niveau).

18. Sentiment d'indépendance par rapport aux contrats

Au cours des entretiens menés en 2012 et 2013, de nombreux agriculteurs se sont plaints de problèmes contractuels avec les sociétés d'exportation d'agrumes. La valeur de cet indicateur a, sur cette base, été reconstituée *a posteriori*.

Lorsque les agriculteurs n'ont aucun lien avec les sociétés d'exportation, soit parce qu'ils vendent directement leur production au souk soit parce qu'ils produisent des volumes tels qu'ils gèrent eux-mêmes l'exportation, maitrisant alors toute la filière de vente, une valeur de 2 leur est attribuée. Lorsque les agriculteurs sont partiellement liés à ces sociétés d'exportation, c'est à dire qu'une partie de leur production est écoulée via ces sociétés et une autre partie est vendue au souk, la valeur de 1 leur est attribuée. Enfin, lorsque la totalité de la production est écoulée via ces sociétés d'exportation, la valeur de 0 est attribuée à l'exploitation.