HAL
open science

Approche d'évaluation de la performance des systèmes irrigués à l'échelle des exploitations agricoles. Cas du périmètre irrigué de Borj Toumi (vallée de la Medjerda-Tunisie)

S. Hanafi

To cite this version:

S. Hanafi. Approche d'évaluation de la performance des systèmes irrigués à l'échelle des exploitations agricoles. Cas du périmètre irrigué de Borj Toumi (vallée de la Medjerda-Tunisie). Sciences de l'environnement. Doctorat Sciences de l'Eau, AgroParisTech, 2011. Français. NNT : . tel-02596823

HAL Id: tel-02596823

https://hal.inrae.fr/tel-02596823

Submitted on 15 May 2020

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

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

THÈSE DE DOCTORAT DE L'AGRO PARIS TECH

Spécialité : **Sciences de l'eau**

Présentée par : **Salia HANAFI**

APPROCHE D'EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES SYSTEMES IRRIGUES A L'ECHELLE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES.

Cas du périmètre irrigué de Borj Toumi
(vallée de la Medjerda-Tunisie)

Soutenue publiquement le 19 décembre 2011

Devant le jury composé de:

	Président
M. Jean-Claude MAILHOL, Directeur de recherche	Directeur de thèse
M. Philippe LEGRUSSE, Maître de conférences	Co-encadrant
M. Patrick RIO, Directeur de recherche	Rapporteur
M. Luis Santos PEREIRA, Professeur	Rapporteur
M. Marcel KUPER, Directeur de recherche	Examinateur
M. Abdelaziz ZAIRI, Maitre de recherche	Examinateur
M. Pierre RUELLE, Chercheur	invité
M. Jean Christophe Poussin, Directeur de recherche	Invité

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech) est un Grand Etablissement dépendant du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, composé de l'INA PG, de l'ENGREF et de l'ENSIA (décret n° 2006-1592 du 13 décembre 2006)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre du RCP SIRMA (économies d'eau en Système IRrigué au MAghreb) au sein du laboratoire "Gestion des systèmes d'irrigations, valorisation des eaux marginales et aménagements hydro-agricoles" de l'Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF) de Tunis (Tunisie) et du Centre des Etudes en Machinisme Agricole, Génie Rural, Eau et Forêts (Cemagref) et de l'UMR Gestion de l'EAU, Acteurs, Usages (G-EAU) de Montpellier (France). Au-delà de l'allocation de recherche, le projet SIRMA a été avant tout un espace convivial propice à l'échange. La richesse des rencontres m'a permis d'évoluer tant sur le plan professionnel que personnel. Je profite de ce mémoire pour remercier vivement et avec une grande émotion toute la famille SIRMA, et en particulier Pierre Ruelle. Son apport scientifique et son travail de coordination ont été un véritable catalyseur pour avancer efficacement.

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements à Jean-Claude Mailhol pour avoir accepté de diriger ce travail. Il a su être à la fois un guide et un analyste pertinent dans ses remarques, critiques et orientations permettant de maintenir ce travail de recherche sur les rails.

Je remercie Philippe Le Grusse, Abdelaziz Zaïri et Pierre Ruelle qui ont joué un rôle clé dans mon initiation à la recherche. Je tiens à leur exprimer ma reconnaissance pour leurs orientations dans mes débuts dans la recherche, pour leur appui tout au long de ce travail, et pour le suivi des différentes phases.

Je voudrais également remercier Jean Christophe Poussin, avec qui les discussions ont été très intéressantes et utiles, et qui m'a beaucoup aidé en traitement de données.

Je remercie également les rapporteurs de cette thèse, Luis Santos Pereira et Patrick Rio pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture et l'évaluation de ce document, et à l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, ainsi que Marcel Kuper et Abdelaziz Zaïri pour avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Je pense à mon amie Wafa Ghazouani pour ses précieux conseils, ses orientations et son aide sur l'outil statistique, ainsi que pour la richesse de nos discussions.

J'exprime ma grande reconnaissance à Lahbib Hizem qui m'a ouvert la porte vers la recherche.

Enfin, j'exprime ma profonde estime pour Mekki Tijani, qui a su, par sa patience et sa rigueur, me soutenir durant les dernières lignes droites de cette thèse.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

A ma mère, qui m'a transmis, par le sang et par l'éducation,

un précieux capital…

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

RESUME

La performance des systèmes irrigués est souvent remise en question. Notre démarche de recherche est initiée par le constat suivant: les approches disciplinaires ayant abordé les performances spécifiques des systèmes sont simplificatrices. De ce fait, les interventions basées sur la seule dimension hydraulique ou économique n'apparaissent pas comme étant les plus adaptées. Il s'avère nécessaire de proposer une approche globale d'analyse et d'évaluation de la performance. Tel est l'objectif général de notre recherche.

Notre démarche comprend trois étapes. La première étape vise à comprendre l'hydraulique du périmètre irrigué afin d'en identifier les causes de disfonctionnement. La deuxième étape procède à deux types d'évaluation: l'une porte sur des mesures hydrauliques *in situ* qui ont permis d'identifier l'indicateur hydraulique le plus pertinent, et l'autre, consiste à évaluer les efficiences économiques. Ces deux sous-étapes constituent une passerelle vers la troisième étape, dans laquelle des regards multidisciplinaires nous ont permis d'identifier les principaux leviers d'amélioration pour enfin proposer des scénarios et justifier leur validité. Le périmètre support de cette étude est sur la basse vallée de la Medjerda en Tunisie.

Mots clés : performance hydraulique, performance économique, approche globale, levier de performance, système irrigué, vallée de la Medjerda.

ABSTRACT

The performance of irrigation systems is often challenged. Our research approach was initiated by the following statement: disciplinary approaches treating the specific performance of irrigation systems simplify their complexity. Thus, interventions based only on the hydraulic or the economic dimensions are not the most suitable. So, it is necessary to use a holistic approach to assess the performance of irrigation systems, as is the overall goal of our research.

Our approach includes three main steps. The first step is to understand the hydraulic aspects of the irrigation scheme in order to identify its causes of dysfunctions. The second step proceeds to two types of assessments: the first one deal with *in situ* hydraulic measurements which allowed identifying the most pertinent hydraulic indicator; the second one deal with the analysis of the techno economic data in order to evaluate the economic efficiency. These two steps are a gateway to the third step, in which viewpoints of the hydraulic engineer and the economist identified key levers for better performance and then propose some scenarios and justify their validity. The studied irrigation scheme is localized on the Medjerda river in northern Tunisia.

Keywords: hydraulic performance, economic performance, holistic approach, performance lever, irrigation system, Medjerda river.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Sommaire Page

Introduction générale 1
Chapitre 1 : Les concepts de performance des systèmes irrigués 4
1.1. Introduction 4
1.2. Performance hydraulique 5
1.2.1. Indicateurs d'uniformité 5
1.2.2. Indicateurs d'efficience hydraulique 7
1.3. Performance agronomique 8
1.3.1. Rendement (t/ha) 8
1.3.2. Productivité de l'eau et efficience de l'utilisation de l'eau 8
1.4. Performance économique 9
1.4.1. Productivité 9
1.4.2. Notion d'efficience 10
1.5. Dimension transdisciplinaire de la performance 14
1.5.1. Cadre théorique des questions d'optimisation 15
1.5.2. Caractérisation de la fonction de revenu duale 15
Chapitre 2: Les périmètres irrigués de la basse vallée de la Medjerda: Une situation actuelle préoccupante 17
2.1. Périmètres irrigués de la vallée de la Medjerda : historique 17
2.2. Infrastructure hydraulique et gestion de l'eau 18
2.3. Une situation actuelle préoccupante 19
2.4. Le périmètre irrigué de Borj Toumi: un système hydraulique contrasté 20
2.5. Conclusion 22
Chapitre 3 : Evaluation et analyse de la demande en eau dans le périmètre de Borj Toumi-Tongar 23
3.1. Introduction 23
3.2. Matériel et méthodes 24
3.2.1. Enquête de structure et typologie des exploitations 24
3.2.2. Méthode de calcul de la demande en eau d'irrigation à l'échelle du périmètre 24
3.3. Résultats 26
3.3.1. Occupation du sol et techniques d'irrigation utilisées 26
3.3.2. Typologie des exploitations 27
3.3.3. Besoins nets en eau des cultures installées 29
3.3.4. Capacité du réseau et besoin en eau d'irrigation du périmètre 29
3.4. Discussion 30
3.5. Conclusion 31
Chapitre 4 : Evaluation des indicateurs de performance hydraulique 32
4.1. Introduction 32

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.2. Doses appliqués, efficiences et uniformité 32
4.2.1. Doses appliquées 32
4.2.2. Efficience et uniformité de distribution 33
4.4. Discussion 36
4.5. Conclusion 36
Chapitre 5 : Analyse de la performance des systèmes irrigués dans une approche globale à l'échelle de la parcelle 40
Résumé 40
Abstract 40
5.1. INTRODUCTION 41
5.2. Materials and methods 42
5.2.1. Case study and data survey 42
5.2.2. Hydraulic indicators 43
5.2.3. Analysis of techno-economic data 43
5.2.4. DEAP Program 45
5.2.5. Statistics 46
5.3. Results 47
5.3.1. Hydraulic results 47
5.3.2. Conventional economic indicators 47
5.3.4. Efficiency scores 49
5.3.5. Analysis of efficiency scores 49
5.4. Discussion 53
5.5. CONCLUSION 54
Chapitre 6 : Performance des exploitations agricoles: démarche globale d'analyse et tests de scénarios 56
6.1 Introduction 56
6.2. Méthode 57
6.2.1. Indicateurs économiques partiels 57
6.2.2. Niveau d'efficience technique et d'utilisation de l'eau 58
6.2.3. Analyse des déterminants du niveau d'efficience à l'échelle de l'exploitation. 59
6.2.4. Définition et simulation de scenarios 59
6.3. Résultats et discussions 59
6.3.1. Situation de référence actuelle 59
6.3.2. Définition et simulation de scénarios 63
6.4. Conclusion 66
Conclusion générales et perspectives 68
Références bibliographiques 72
Annexes 83

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Organigramme de la thèse 3
Figure 2. Les composantes de la performance 5
Figure 3. Représentation graphique (Farrell 1957) de l'efficience technique et de l'efficience allocative: cas de deux inputs et un output 12
Figure 4. Évolution de la vente d'eau sur la superficie à moderniser (5500 ha) 20
Figure 5. Localisation du périmètre irrigué de Borj-Toume-Tongar (Tunisie) 21
Figure 6. Évolution du volume d'eau pompé sur le périmètre Borj Toumi-Tongar 22
Figure 7. Les coefficients culturaux (Kc) des cultures installées 25
Figure 8. Profondeurs d'enracinement des cultures installées 26
Figure 9. Ventilation des cultures pratiquées sur l'ensemble des exploitations familiales 27
Figure 10. Ventilation des techniques d'irrigation sur les deux secteurs de distribution d'eau 27
Figure 11. Cercle des corrélations de l'ACP sur le plan principal 28
Figure 12. Profils d'humidité avant et après irrigation (tomate en goutte à goutte) 35
Figure 13. Mesure de débit à l'entrée de la parcelle par un seuil Parshall 38
Figure 14. Pratiques de répartition de l'eau dans les planches de submersion 38
Figure 15. Pratiques de répartition de l'eau en irrigation de poirier par double raie 38
Figure 16. Pertes d'eau dans les conduites de distribution vers la parcelle sur un réseau par aspersion 39
Figure 17. Pertes d'eau sur les portes rampes d'un réseau en goutte à goutte 39
Figure 18. Data envelopment analysis (from Rodriguez-Diaz et al., 2004) 44
Figure 19. Mean technical efficiency for tomato according to the yield and the access to water 51
Figure 20. Mean IWUE for olive trees according to the yield and the access to water 52

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Résultat d'analyse granulométrique du sol 25

Tableau 2. Valeur moyenne des paramètres hydro-physiques du sol 25

Tableau 3. Caractéristiques de l'exploitation type des classes d'agriculteurs. 28

Tableau 4. Besoins net en eau d'irrigation durant le mois de juillet en année médiane. 29

Tableau 5. Besoin brut en eau d'irrigation durant juillet à l'échelle de chaque classe, secteur et l'ensemble des exploitations familiales..... 29

Tableau 6. Confrontation de la capacité du réseau au besoin brut en eau d'irrigation à l'échelle des secteurs et à l'échelle de l'ensemble des exploitations familiales durant juillet..... 30

Tableau 7. Résultats de mesures de doses brutes (DB), de l'efficience de distribution vers la parcelle (Ed) et de l'uniformité de distribution (UD) en irrigation de surface 34

Tableau 8. Résultats de mesures du coefficient d'uniformité des débits (Cu), coefficient d'uniformité de Christiansen (Cu Christiansen), l'uniformité de distribution (UD) et de l'efficience de distribution vers la parcelle (Ed) en irrigation par aspersion 34

Tableau 9. Résultats de mesures du coefficient d'uniformité (Cu) et de l'efficience de distribution vers la parcelle (Ed) en irrigation localisée 35

Tableau 10. Statistics for measured hydraulic indicators..... 47

Tableau 11. Descriptive statistics of economic data related to crop surfaces (S) variable costs (VC), gross margins (GM) and yields, (DT: Tunisian dinar, 1 DT=1.8 €) 48

Tableau 12. Analysis' results of the gross margin (GM) in relation to gross margin (GM) and the On-farm distribution efficiency (DE). 48

Tableau 13. Basic statistics for TE and IWUE for olive, fruit orchards, tomato and wheat..... 49

Tableau 14. Mean technical efficiency for different sources of variation at the plot level.One-way analyses of variance using parametric tests (the assumptions of the normally distribution with the same variance were full for all the samples) 50

Tableau 15. Mean/Median IWUE for different sources of variation at the plot level. 52

Tableau 16. Valorisation moyenne en termes de marge nette (MN) des facteurs de production terre, eau et input variable (MN/superficie, MN/volume d'eau d'irrigation, MN/input variable) par les différentes spéculations adoptées 60

Tableau 17. Statistiques descriptives des revenus nets des exploitations enquêtées 60

Tableau 18. Scores des efficiences techniques et d'utilisation de l'eau à l'échelle de l'exploitation 61

Tableau 19. Médiane/moyenne (M), premier quartile (Q1) et troisième quartile (Q3) de l'efficience technique (TE) et de l'efficience d'utilisation de l'eau (IWUE) pour différentes sources de variation. 62

Tableau 20. Impact du scénario 1 sur l'amélioration de la capacité du réseau à satisfaire le besoin brut en eau d'irrigation durant le mois de pointe (juillet) 63

Tableau 21. Impact du scénario 1 sur le volume brut d'eau d'irrigation, le revenu net, TE et IWUE à l'échelle de l'exploitation..... 64

Tableau 22. Impact du scénario 2 sur l'TE, l'IWUE et le revenu net 65

Tableau 23. Impact du scénario 3 sur le revenu net, l'TE et l'IWUE à l'échelle du périmètre 66

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Introduction générale

Le développement de l'agriculture irriguée était et continue à être indispensable pour atteindre les objectifs des stratégies alimentaires à long terme. Pour cela, depuis des décennies d'importants efforts pour la mobilisation et la gestion des ressources en eau ont été réalisés par les pouvoirs publics. (eg. Barrage d'Assouan à la Vallée du Nil en Egypte barrage de Markala à Office du Niger au Mali, Bassin de la Narmada en Inde, Tadla et Gharb au Maroc,Métidja en Algérie, vallée de la Medjerda en Tunisie, …). Il en a résulté extension spectaculaire des superficies irriguées. A l'échelle mondiale, l'agriculture irriguée fournit 30% de toute la production agricole sur seulement 17% de la superficie des terres cultivables (Hillel, 2000). Dans les pays en voie de développement, elle contribue à hauteur de 40% des besoins alimentaires sur 20% des terres cultivées (FAO, 2002).

Aujourd'hui l'agriculture fait face à deux défis majeurs. Une nécessité accrue d'augmenter la production agricole pour nourrir une population mondiale en accroissement. Cet accroissement s'accomplit sous des conditions de ressources en eau de plus en plus limitées et couteuses. Plus particulièrement, la Banque mondiale a classé les pays du Maghreb parmi les régions pauvres en eau. La rareté accrue de l'eau reste une préoccupation nationale qui menace l'économie de ces pays. Située en zone aride et semi-aride, la Tunisie est dotée de ressources naturelles limitées. Sur ses fonds propres renforcés par des fonds internationaux, une stratégie de "la grande hydraulique" a été mise en place pour la construction de grands barrages. Le développement de l'agriculture irriguée a constitué un axe privilégié de la politique publique. En 2001, la superficie équipée en systèmes générateurs d'économie de l'eau a atteint 245 000 ha, soit 67% de la superficie totale irrigable. Le programme national d'économie d'eau s'est fixé pour objectif d'équiper 90 % de la superficie irriguée à l'horizon 2006. Le secteur irrigué couvre 400 000 ha ce qui représente seulement 7% de la surface agricole utile mais qui contribue pour 35% de la production agricole; l'objectif est d'atteindre 50% (Al Atiri, 2005). Le pays est arrivé presque à la limite des possibilités de mobilisation de la ressource en eau. Outre les efforts déployés pour l'installation de techniques économes en eau le pays se trouve confronté à un défi majeur, celui de l'exploitation rationnelle de cette ressource rare et qui doit être partagée avec d'autres secteurs.

Cependant, ces aménagements hydrauliques ont été exploités sans souci de la dimension sociale et économique. En conséquence et comme a montré certaines études, l'utilisation actuelle de l'eau agricole est loin d'être rationnelle (SCET-TUNISIE et HYDROPLAN, 2002). De même, étant à l'abri de la concurrence extérieure, les exploitations agricoles ont longtemps adopté un mode de production caractérisé par une faible innovation, des gaspillages de ressources. Actuellement, un mouvement de libéralisation des échanges de produits agricoles s'est amorcé. L'environnement extérieur de la Tunisie est en train d'évoluer. Cette évolution s'articule autour de quelques grands axes : un espace méditerranéen plus intégré et moins protectionniste, une économie européenne plus ouverte sur les pays de sa zone d'influence, une économie mondiale plus libérale et plus intégrée. Or, les pays de la région ont des productions concurrentes et leurs dotations en ressources sont inégales. Pour cela, la recherche de performance devient une préoccupation constante tant au niveau global qu'au niveau des exploitations.

Dans ce contexte aussi marqué par la remise en question de la rentabilité des systèmes irrigués, les changements techniques n'ont pas atteint leurs objectifs et les performances hydrauliques, agronomiques et économiques restent modestes. Plusieurs causes complexes et de natures variées peuvent être à l'origine de ces défaillances. Il importe donc de s'interroger sur les facteurs pertinents qui influencent la performance d'un système irrigué, et sur les possibilités d'amélioration de la performance dans un contexte physique et socioéconomique donné. Notre objectif de recherche s'inscrit dans ce contexte. Il s'agit d'élaborer une réflexion

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

selon une approche globale pouvant apporter des éléments de réponse à ce problème de rentabilité des systèmes irrigués. Pour cela, il s'agira d'analyser les performances des exploitations agricoles en irrigué en utilisant des indicateurs propres à caractériser les efficiences d'irrigation, les résultats agronomiques et économiques de ces systèmes.

L'originalité de notre approche réside dans la volonté de tenir compte simultanément des résultats de l'analyse technique (facteurs hydrauliques, et agronomiques) et économiques sur l'unité pertinente de décision: l'exploitation agricole. Il conviendra tenir également compte de l'interaction entre les différentes composantes des systèmes de production. Pour cela, notre méthodologie cherche à établir des liens entre ces critères de performance à partir d'analyses de données. Il s'agit tout d'abord de comprendre le fonctionnement du périmètre dans son contexte physique, économique et social en tentant d'identifier les facteurs limitant la performance des exploitations agricoles. On procèdera pour cela à la mesure et à l'analyse des indicateurs spécifiques de performance les plus pertinents.

L'analyse de l'interaction entre ces indicateurs spécifiques permettra de proposer des pistes d'amélioration. Celles-ci, combinées à une stratégie de fonctionnement du périmètre préalablement identifiée, serviront de base à la définition de scénarios. La simulation des scénarios proposés permettra d'évaluer leur effet sur la valorisation des différents facteurs de production (Figure 1).

Notre approche s'avère nécessaire dans une optique d'amélioration de la gestion des ressources en eau et en capital et de réussite des interventions de l'état dans les périmètres irrigués collectifs. En effet, basée sur une reconnaissance de la diversité des systèmes de production, elle permet de dépasser les modèles techniques applicables à tout système irrigué sans considérer ni les spécificités locales ni le contexte socioéconomique. Notre démarche confère à ce type d'analyse une crédibilité dans la mesure où elle se fonde sur des mesures hydrauliques et des résultats économiques réels. Cette démarche a été appliquée à l'ensemble des exploitations familiales agricoles du périmètre irrigué de Borj Toumi de la basse vallée de la Medjerda, situé au nord de la Tunisie. Ce périmètre, qui a subi des changements au cours de son histoire, est actuellement soumis à des contraintes de distribution d'eau et des contraintes socioéconomiques. Outre la représentativité et la complexité de ce périmètre, la taille homogène des exploitations et la diversité des pratiques et des stratégies des agriculteurs a permis d'appréhender cette complexité et d'explorer les deux niveaux d'échelle, l'échelle de la parcelle et l'échelle de l'exploitation.

L'intérêt de ce travail est double. En effet, dans un premier temps il s'agit de compléter l'état des connaissances en explorant un champ nouveau : parmi les nombreuses études menées sur le thème performance, celles qui s'intéressent précisément à l'interaction entre les performances spécifiques à l'échelle de la parcelle et à l'échelle de l'exploitation sont rares. Cette étude permettra d'actualiser les recherches moins récentes sur le même thème. L'autre intérêt est de servir de guide aux décideurs du ministère de l'agriculture, dans un contexte de restructuration des anciens périmètres de la Medjerda. En effet, un plan de modernisation a été initié. Il vise le changement du réseau de distribution gravitaire en un réseau sous pression. Notre étude permettra aux décideurs de savoir quel est le niveau de performance des exploitations agricoles et sur quel(s) levier(s) ils pourront agir pour améliorer cette performance afin de valoriser l'infrastructure hydraulique et d'améliorer la situation économique des périmètres irrigués.

Ce mémoire de thèse est présenté en six chapitres : Le premier chapitre traite du cadre théorique en matière d'analyse et d'évaluation des performances des systèmes irrigués; il présente une revu bibliographique sur les méthodes adoptées pour mener ce travail de recherche. Le deuxième chapitre se propose de présenter le système de la Medjerda pour comprendre le contexte historique et l'importance agro-socio-économique des périmètres de

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

cette vallée. Il s'agit d'une première analyse d'ensemble des composantes d'un système irrigué qui a été soumis à des changements au cours de son histoire et dont la situation actuelle est préoccupante. Le troisième chapitre dresse un constat sur le périmètre irrigué de Borj Toumi, support de l'étude. On évalue la demande en eau du périmètre pour la comparer à l'offre du réseau de distribution d'eau. Les résultats de ce chapitre constituent un point de départ pour identifier les obstacles à l'amélioration de la performance des exploitations agricoles. Le quatrième chapitre se propose d'évaluer des indicateurs de performance hydraulique passerelle nécessaire pour conduire à une évaluation de la performance globale des systèmes irrigués. L'analyse de l'influence mutuelle du contexte hydraulique et du contexte socioéconomique fera l'objet du chapitre 5 où on se propose d'étudier la performance globale et ses déterminants à l'échelle de la parcelle. Le chapitre 6 analyse la performance globale à l'échelle des exploitations agricoles et ses déterminants. Ces derniers associés aux résultats du troisième chapitre, permettront de définir des scénarios puis de simuler leurs conséquences sur la valorisation des facteurs de production. La conclusion porte d'une part sur les principaux résultats en relation avec la performance actuelle des exploitations agricoles, ses déterminants et les mesures de son amélioration et d'autre part sur la validité et les limites de l'approche proposée.

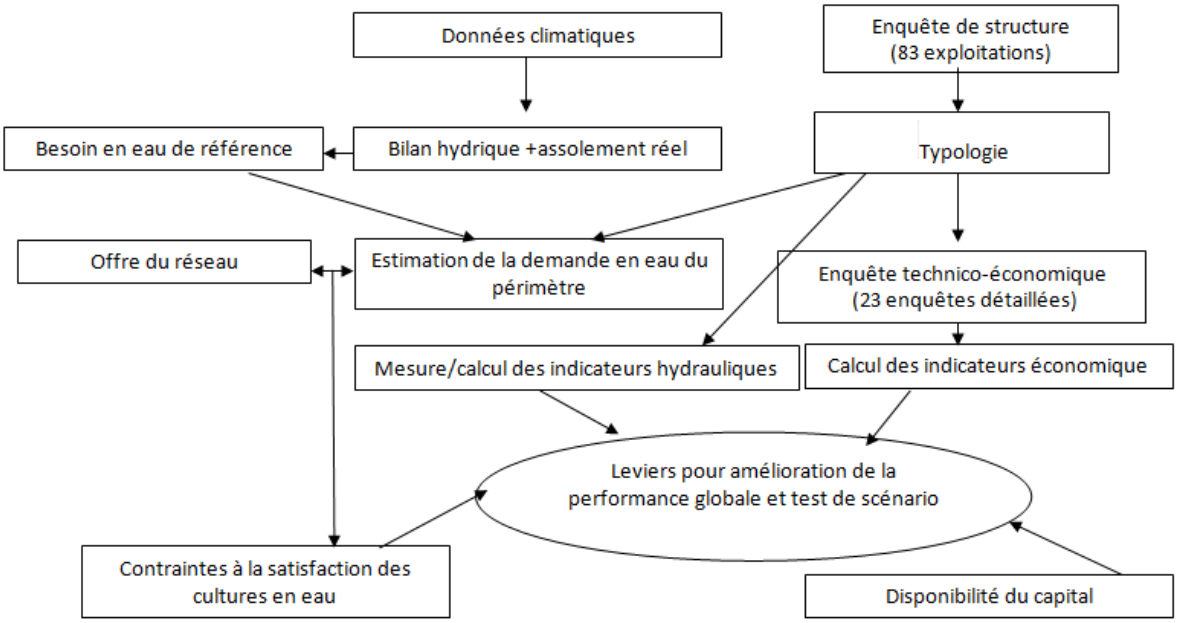


Figure 1. Organigramme de la thèse

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 1 : Les concepts de performance des systèmes irrigués

Dans ce chapitre, nous proposons une synthèse bibliographique pour replacer l'étude de la performance d'un système dans son contexte disciplinaire, et justifier une approche interdisciplinaire nous permettant une analyse plus pertinente de notre problématique. Dans ce travail, le terme "efficience économique" (ou efficience technique) est la traduction de l'anglais du terme "economic efficiency" (ou technical efficiency). Dans la littérature en français, ce même terme est parfois exprimé par "efficacité économique".

1.1. Introduction

La performance est une notion relative qui consiste à atteindre des objectifs donnés, en disposant de ressources forcément limitées et dans un environnement soumis à des changements. Murray-Rust et Snellen (1993) distinguent deux types de performances; la performance opérationnelle qui s'intéresse à mesurer à tout moment si les objectifs sont atteints, pour répondre à la question: "*est-ce que je fais les choses bien?"* et la performance stratégique, ou "performance de fonctionnement" qui évalue, à plus long terme, si les ressources disponibles sont utilisées pour atteindre efficacement les objectifs, pour répondre à la question: "*est-ce que je fais les bonnes choses?"*. Dans ce cas, les objectifs peuvent être comparés à des standards adaptés aux conditions du site étudié.

La performance est exprimée par différents types d'indicateurs. Ces indicateurs traduisent les objectifs spécifiques d'un système. Leur élaboration est un moyen de communiquer la mission et la stratégie de ce système pour canaliser les ressources vers la réalisation de ces objectifs. Un indicateur est considéré comme étant approprié s'il correspond au critère de performance pertinent, qui peut être quantitatif ou qualitatif. La performance peut être exprimée en termes d'efficience et d'efficacité. *L'efficience* met en relation les résultats obtenus et les moyens utilisés (ou les coûts engendrés). Elle permet de répondre à la question: "est-ce que les résultats sont suffisants compte tenu des moyens utilisés?". *L'efficacité* met en relation les résultats obtenus et les objectifs fixés (

Figure 2). C'est une notion relativement nouvelle en sciences de gestion, et complexe si l'on considère ses différentes dimensions et les différentes approches existantes pour la mesurer. La délimitation entre efficience et efficacité se fait par les notions de non oisiveté des ressources (plein emploi) et de non gaspillage (utilisation de la juste quantité nécessaire, pas plus) (Guerrien, 2002). En d'autres termes, l'efficacité requiert l'atteinte des objectifs, tandis que l'efficience introduit la minimisation des ressources employées. L'objectif ultime de l'évaluation de la performance est de réaliser des institutions efficientes et efficaces qui se traduisent par un feedback pertinent à différentes échelles (Akbari et al., 2007).

Dans le secteur agricole, plusieurs approches ont été proposées pour l'analyse et l'évaluation de la performance des systèmes irrigués. Ces approches traitent, séparément ou à la fois, des aspects hydraulique, agronomique, économique, environnemental, social et organisationnel (Clemmens et al.,2000). Nous allons analyser individuellement les aspects hydrauliques, agronomiques et économiques puis l'aspect synthétique ou global de la performance. Nous avons orienté cette analyse bibliographique vers l'identification des limites des différentes approches.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

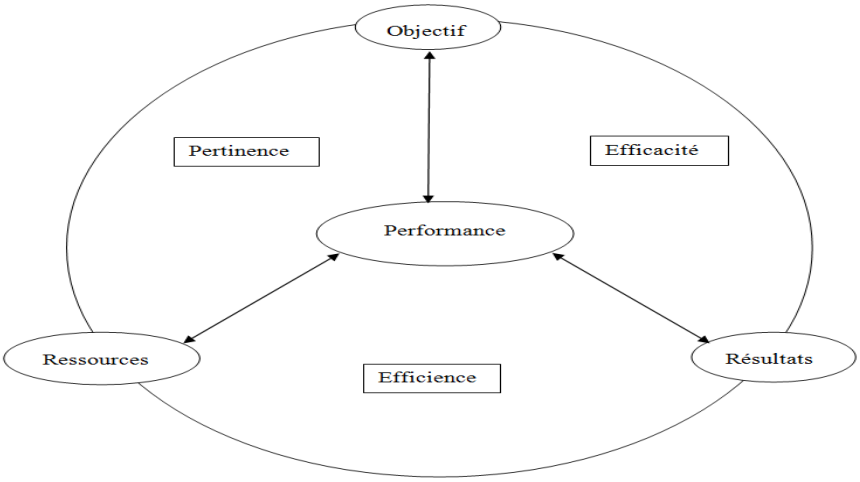


Figure 2. Les composantes de la performance

1.2. Performance hydraulique

La performance hydraulique des systèmes irrigués est exprimée en termes d'efficience basée sur les quantités d'eau mesurées à différents points du système de distribution de l'eau. Le rapport des quantités en amont et en aval définit l'efficience d'une partie bien déterminée du système. L'objectif principal de l'engineering en irrigation était toujours d'augmenter ces efficiences (Akbari et al., 2007). Plusieurs indicateurs ont été déterminés pour exprimer la performance hydraulique des systèmes irrigués. Levine (1982) a présenté un indicateur de l'offre de l'eau défini comme le rapport de l'offre totale en eau à la demande en eau des cultures. Mais si cet indicateur reflète le niveau de satisfaction de la demande en eau, il ne reflète pas si les cultures ont reçu l'eau en temps opportun. De même, la performance des systèmes d'irrigation est analysée en appliquant des modèles de bilan hydrique et dont les indicateurs de performance sont basés sur des valeurs moyennes pour l'ensemble du périmètre irrigué (Kloezen et Garcés-Restrepo, 1998; Molden et al., 1998; Burt et Styles, 1999). Mais cette procédure ne reflète pas d'une façon précise les pratiques d'irrigation réelles, comme elle ne met pas en relief les différences des pratiques des irrigations entre les agriculteurs, sauf si les volumes d'eau par parcelle sont accessibles pour caractériser la variabilité qui existe entre agriculteurs (Lorite et al., 2004).

Il n'y a pas d'indicateur unique qui permette de définir à lui seul et de façon appropriée la performance hydraulique d'un système d'irrigation sur une parcelle. Si l'objectif du système hydraulique est de maintenir un niveau de teneur en eau dans le sol favorable à la croissance des plantes dans un contexte d'économie d'eau, les critères de qualité d'un arrosage dépendent de la quantité d'eau stockée dans la zone racinaire, de celle percolée sous cette zone, des pertes en colatures lorsqu'elles existent, de l'uniformité d'application et de l'importance de la zone sous irriguée après un arrosage. Les indicateurs les plus souvent utilisés sont des indicateurs d'uniformité et des indicateurs d'efficience.

1.2.1. Indicateurs d'uniformité

Selon Burt (2000), l'accroissement des rendements serait le plus souvent dû à une amélioration des uniformités d'arrosage, d'où l'importance de cet indicateur de performance, pour lequel différents protocoles standards de mesure existent dans la littérature. Plusieurs paramètres on été utilisés comme indicateurs d'uniformité d'application de l'eau. Les plus utilisés sont l'uniformité de distribution (UD) et le coefficient d'uniformité (CU) (Heermann et al., 1990).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1.2.1.1. Uniformité de distribution

L'uniformité de distribution (DU) est définie, en irrigation de surface, par le rapport de la hauteur d'eau moyenne infiltrée sur le quart le moins arrosé de la placette de mesure (Z_{lq}) à la hauteur d'eau moyenne infiltrée sur l'ensemble de la placette (Z_{av}). Si Z_{lq} est remplacée par la hauteur d'eau minimale, DU devient un indicateur d'uniformité de distribution absolu (DU_{sbs})

$$\mathrm{DU} = 100\frac{Zlq}{Zav}$$

Il en est de même pour l'irrigation par aspersion, où les hauteurs d'eau infiltrées sont remplacées par les hauteurs d'eau observées, et en irrigation localisée, où ces hauteurs d'eau sont remplacées par les débits des distributeurs observés.

Selon Pereira (1999), l'uniformité de distribution dépend :

- *en irrigation de surface*, de la conception du réseau et des variables qui caractérisent une irrigation (débit de la raie, temps d'irrigation, pente, rugosité, caractéristiques physiques du sol, forme de l'élément d'irrigation, longueur de l'élément d'irrigation).
- *en irrigation par aspersion*, de la pression de service, de la variation de cette pression durant l'irrigation, de l'espacement entre les asperseurs, de la nature des buses, des caractéristiques de l'asperseur et de la vitesse du vent.
- *en irrigation localisée*, de la pression au niveau des distributeurs ainsi que sa variation, des caractéristiques des distributeurs et leur sensibilité à la variation de la pression et à l'obstruction.

1.2.1.2. Coefficient d'uniformité

La définition du coefficient d'uniformité (CU) dépend du système d'irrigation.

En irrigation à la raie, le CU est généralement défini selon Meriem et Keller (1978) par le rapport entre la dose moyenne relative au dernier quart Z_{Lq} de raie et la dose totale infiltrée. Celle-ci comprend celle stockée dans la zone racinaire Vzr, et celle perdue par percolation Vp/L, Vzr et Vp étant respectivement le volume stocké dans la zone racinaire et le volume percolé, L étant la longueur de la raie, d'où :

$$CU = 100\frac{Z_{Lq}}{\frac{Vzr + Vp}{L}}$$

Compte tenu de la variabilité spatiale du processus avancement-infiltration, l'estimation de ces critères à l'échelle de la parcelle nécessite d'effectuer ces calculs au niveau d'une raie représentative des caractéristiques moyennes du processus avancement-infiltration.

En irrigation par aspersion, il est plus fréquent d'utiliser le coefficient d'uniformité introduit par Christiansen (1942) :

$$\mathrm{CU} = 100\ (1 - \mathrm{SD/M})$$

où SD est l'écart type (standart deviation) et M la moyenne des hauteurs d'eau mesurées à l'aide de pluviomètres disposés au centre des mailles d'un réseau quadrillant la parcelle ou l'élément de parcelle étudiée. Le CU permet de caractériser la qualité de l'application d'eau, sachant que, pour une dose requise donnée, l'uniformité de son application est fortement conditionnée par la vitesse du vent et le système d'irrigation utilisé. Par exemple, sous pivot, l'uniformité d'application peut être largement supérieure à celle des autres systèmes (couverture totale ou intégrale).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

En irrigation localisée, le CU s'exprime de la même manière que pour l'irrigation par aspersion, en remplaçant les hauteurs d'eau mesurées par les débits des distributeurs.

1.2.2. Indicateurs d'efficience hydraulique

1.2.2.1. Efficience d'application

Selon Burt et al. (1997), l'efficience d'application se définit comme le rapport du volume Vzr réellement stocké dans la zone racinaire zr et le volume total apporté V_T. Vzr doit satisfaire la condition Vzr ≤ SWD, SWD étant la réserve stockable dans la zone racinaire au moment de l'irrigation.

$$Ea = 100\frac{Vzr}{V_T}$$

En irrigation par aspersion, V_T se compose du volume stocké dans la zone racinaire et du volume percolé.

En irrigation à la raie, V_T se compose du volume stocké dans la zone racinaire et du volume percolé, auxquels s'ajoute le volume ruisselé en colature.

En irrigation localisée, l'infiltration présente soit un caractère axi-symétrique pour le cas d'une source ponctuelle, soit un caractère bidirectionnel pour le cas d'une source en ligne. De ce fait, la mesure au champ des indicateurs de performance hydraulique est assez délicate. Connaissant le débit des goutteurs et les durées d'arrosage, il est possible d'estimer les percolations sous la zone racinaire, dans l'hypothèse où l'humidité initiale est connue en début de campagne d'irrigation, et d'en déduire ainsi l'efficience d'application. Des équipements tels que tensiomètres dans le voisinage et en dessous de la zone racinaire peuvent contribuer à préciser cette estimation.

1.2.2.2. Efficience d'application du quart le moins arrosé

L'efficience d'application du quart le moins arrosé (AELQ) est définie par Merriam et Keller (1978) comme suit :

$$AELQ = 100\frac{Zr,lq}{D}$$

où $Z_{r,lq}$ est la hauteur d'eau moyenne ajoutée à la zone racinaire sur le quart le moins arrosé (mm) et D la hauteur d'eau moyenne appliquée (mm). Dans le cas d'une sous-irrigation, AELQ donne une information sur la non uniformité de l'application de l'eau d'irrigation.

Selon Pereira (1999), l'efficience d'application dépend:

- *en irrigation de surface*, de l'uniformité de distribution et du déficit du sol en eau (SWD) au moment de l'irrigation.
- *en irrigation par aspersion*, de l'uniformité de distribution, de la pluviométrie de l'asperseur, de la durée de l'irrigation et du déficit en eau du sol au moment de l'irrigation. Cette efficience dépend donc de la conception du réseau et de la pression du réseau de distribution de l'eau, des caractéristiques des asperseurs et des paramètres de l'irrigation contrôlés par l'irrigant.
- *en irrigation localisée*, de l'uniformité de distribution, de la conductivité hydraulique du sol, de l'humidité du sol avant irrigation, de la durée et de la fréquence des irrigations. Le contrôle, l'entretien et la maintenance des équipements ainsi que la conception du réseau et la qualité du service de distribution sont importants.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Selon Pereira et all (2011), la performance des systèmes d'offre de l'eau et de son utilisation est souvent exprimée en termes d'efficience. Mais plusieurs définitions ne sont pas acceptées et les termes d'efficience sont utilisés dans différents sens. Pour une meilleure compréhension de la terminologie utilisée, une approche conceptuelle plus consistante est nécessaire. Il est donc nécessaire de bien définir le sous-système considéré et de définir l'efficience par un rapport entre la hauteur d'eau utilisée par ce sous-système et la hauteur d'eau qui lui a été fourni. Bien qu'actuellement, il y a une tendance à abandonner le terme efficience pour le transport et la distribution de l'eau d'irrigation pour adopter des indicateurs de performance de service.

La performance hydraulique est assez difficile à appréhender, car elle impose de s'intéresser à chaque parcelle en tenant compte des différents systèmes d'irrigation et de la culture. La mesure des indicateurs hydrauliques se fait généralement sur des parcelles d'essai. Selon Burt (2000), l'accroissement des rendements serait le plus souvent dû à une amélioration des uniformités d'arrosage, mais cette relation, établie selon des protocoles d'essai, suppose constant le reste du paquet technologique. Cependant, d'autres paramètres non techniques pourraient agir sur la prise de décision des irrigants, notamment les contraintes économiques (Imache, 2008).

1.3. Performance agronomique

En agronomie, l'irrigation est considérée comme une des pratiques culturales que l'agriculteur est amené à gérer (Sabatier et Ruf, 1991). L'agronome s'est concentré sur l'étude de la productivité de l'eau et des relations eau-plante-climat (Sarma et Rao, 1997; Singh et al., 2006; Lorite et al., 2007), surtout que le secteur de l'agriculture fait face au défi de produire plus avec moins d'eau. Plusieurs études ont focalisé sur les indicateurs agronomiques avec une tendance à étudier la productivité de l'eau d'irrigation et ''crop per drop'' dans la relation eau-plante. Doorenbos et Kassam (1979) ont proposé un travail important et reconnu, en énonçant un facteur de réponse du rendement (ky) qui relie le rendement réel (Yact) à l'évapotranspiration réelle (ETact). Yact = f(ky, Ypot, ETact, ETpot) où Ypot est le rendement potentiel et ETpot est l'évapotranspiration potentielle. En outre, (Zwart et Bastiaanssen, 2004; Dagdelen et al., 2006; Katerji et al., 2008) ont montré que la relation rendement et eau utilisée n'est pas consistante et peut varier même sur un seul site.

1.3.1. Rendement (t/ha)

Le rendement est l'un des indicateurs de performance agronomique; il doit être calculé sur trois à quatre ans pour tenir compte des variabilités inter-annuelles. Des études ont montré que les performances individuelles pourraient être grandement améliorées, sans augmentation des coûts de production. La qualité du suivi de la parcelle, la composition des intrants et leur mode d'application approprié, le respect du calendrier cultural, le contrôle efficace des adventices et la maîtrise de l'eau à la parcelle sont autant de principes d'amélioration des rendements (Projet GCP/RAF/355/FRA, 2004).

1.3.2. Productivité de l'eau et efficience de l'utilisation de l'eau

L'efficience de l'utilisation de l'eau (WUE) est un terme utilisé par les agronomes pour mettre en relation les rendements avec les quantités d'eau utilisées qui ne sont pas spécifiques à une source bien déterminée (Bluemling et al., 2007). Cet indicateur est étroitement lié au système de production des cultures (Condon et al., 2004). Kar et al., (2007) ont montré que l'amélioration de WUE, en appliquant, dans certains mesures, plus d'irrigation, n'était pas significative en termes de rendement de culture.

La productivité de l'eau agricole (AWP) diffère de l'efficience de l'utilisation de l'eau (WUE); elle indique la marge d'amélioration des rendements par rapport à l'eau allouée à la transpiration; la première intègre la deuxième. Pour améliorer la productivité de l'eau il faut

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

choisir des espèces de culture à haute efficience d'utilisation de l'eau. La productivité de l'eau est définie comme la production des cultures par unité d'eau utilisée (Belder et al., 2004; Cantero-Martinez et al., 2003). Dans d'autres cas, ce même indicateur est défini comme étant la valeur économique de la production par unité d'eau utilisée (Sakthivadivel et al., 1999; Droogers et al., 2003; Bessembinder et al., 2005). D'après ces exemples, l'efficience de l'utilisation de l'eau (WUE) et la productivité de l'eau (AWP) sont deux noms différents pour désigner un même critère de performance. Pour éviter toutes confusions, le terme efficience d'utilisation de l'eau (WUE) doit être utilisé seulement pour désigner la performance d'utilisation de l'eau par la plante ou par les cultures, irriguées ou non irriguées, pour produire de la biomasse et/ou un rendement. Le terme productivité de l'eau (WP) doit être utilisé pour désigner la quantité de produit par une quantité d'eau utilisée, consommée ou non consommée par les cultures (Pereira et all., 2011).

Dans la productivité de l'eau dans un sens plus large, une augmentation de quantité d'eau utilisée doit engendrer un supplément pour chaque goutte d'eau. Mais la valeur de la productivité de l'eau ne dépend pas que de l'approvisionnement en eau de la culture. D'autres paramètres, tels que les divers intrants agricoles, le système de culture, etc. influencent également cet indicateur. Dans une certaine mesure, l'approvisionnement relatif en eau est inversement proportionnel à la productivité de l'eau. Il est possible d'économiser de l'eau en diminuant légèrement l'offre par rapport à la demande en eau, sans occasionner de baisses significatives des rendements. La productivité de l'eau permet d'évaluer la performance agronomique, tout en renseignant davantage sur l'efficacité des apports d'eau.

La notion d'efficience d'irrigation et de l'efficience de l'utilisation de l'eau (WUE) sont des indicateurs importants à évaluer, à condition qu'ils soient appropriés à un agriculteur ou à un périmètre irrigué (Zoebl, 2006). Mais l'idée de "more crop per drop" est fastidieuse. Ce terme est empreint du domaine de l'économie dans le sens "*quel est le supplément d'output que peut apporter un supplément d'input?*", où l'input et l'output sont exprimés en termes monétaires. Mais s'il s'agit de la gestion de l'eau en agriculture, ces indicateurs peuvent conduire à des erreurs dans la politique de gestion des systèmes et, par la suite, vers des actions inefficientes et inappropriées. Kuper et al., (2009) ont présenté une approche qui mobilise des acteurs, des expériences et des connaissances, et ce dont l'objectif de durabilité de l'agriculture, l'intégration des contraintes environnementales et l'analyse de nouveaux modes de coordination des filières agricoles et des territoires irrigués. Le blé et le maïs sont plus efficients dans l'utilisation de l'eau quand ils sont stressés et pour avoir une productivité de l'eau des cultures (CWP) optimale dans les zones arides, il vaut mieux irriguer le blé et le maïs avec une quantité d'eau optimale recommandée pour maximiser les rendements.

La performance agronomique qui peut donc être exprimée par un rendement ou par la productivité de l'eau ou encore par l'efficience de l'utilisation de l'eau, reste une notion appropriée à un contexte physique donné.

1.4. Performance économique

1.4.1. Productivité

La croissance économique dans les pays à vocation agricole exige une révolution au niveau de la productivité des exploitations agricoles (World Bank, 2008). La productivité est généralement définie comme le rapport entre une production quelconque et l'ensemble des intrants nécessaires pour la produire. Elle représente donc le degré d'efficacité avec laquelle une entreprise met à profit les ressources dont elle dispose pour fabriquer un produit (Gamache, 2005). L'augmentation de la productivité implique une plus grande quantité de produits en utilisant les mêmes intrants. Pour autant, elle présente des enjeux et des contraintes. C'est la fonction de production qui, au niveau d'une exploitation agricole, met en relation la quantité maximale de l'output qui peut être obtenue par une combinaison des

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

différents facteurs de production. Cette fonction caractérise donc les relations entre les quantités produites et l'ensemble des facteurs utilisés avec les différentes techniques (Brossier, 2007).

En agriculture**,** deux considérations ont donné naissance à la productivité: le rendement et l'efficience. Au sens strict du terme, le rendement est la production par unité de terre. Il mesure donc le rapport entre la quantité de produit agricole récoltée et la superficie de terre qui a produit cette récolte (Beitone et al., 2008). Dans ce sens, le rendement concerne la terre, alors que la productivité concerne le travail et le capital.

Différents indicateurs ont été développés pour exprimer la productivité et son évolution. Ces indicateurs peuvent être exprimés par des mesures unifactorielles, mettant en relation la production avec un seul intrant (travail ou capital ou terre), ou multifactorielles qui combinent simultanément les effets de plusieurs intrants (Gamache, 2005). L'augmentation de la production peut donc être comparée à l'augmentation d'un seul facteur de production ou à celle de tous les intrants à la fois (Kaci, 2006). En d'autres termes, l'augmentation de la production peut être comparée à celle de tous les intrants à la fois ou juste à celle d'un seul facteur de production (Kaci, 2006). La productivité unifactorielle se mesure donc comme suit:

productivité unifactorielle = quantité produite/quantité de l'input

productivité du travail=quantité produite/quantité de travail (nombre d'actifs agricoles)

productivité de la terre = quantité produite/superficie de production

productivité du capital = quantité produite/quantité de capital

La productivité globale des facteurs se définit donc comme le rapport des outputs à l'ensemble des inputs effectifs (Blancard et Boussemart, 2006).

Ainsi, la forme générale d'une fonction de production pour une firme quelconque est:

$$y = f(x_1, x_2, \ldots x_j)$$

Avec y = quantité produite ou l'output par la firme considérée; f désigne la fonction de production et (x_1, x_2,... x_j) les facteurs (inputs) utilisés par cette firme. Dans le cas d'une exploitation agricole, les inputs ou les facteurs de production peuvent être le capital, le travail et la terre.

L'analyse de la productivité partielle des facteurs de production prend en compte la contribution d'un facteur à la production. Cependant, cette analyse néglige les interactions entre les facteurs de production. L'analyse de l'efficience économique permet de surmonter cette limite.

1.4.2. Notion d'efficience

Toute activité de production met en jeu des inputs (facteurs) qui constituent des ressources productives à utiliser, et des outputs (production en quantité ou en valeur) qui sont les résultats de l'activité de production. L'évaluation de la performance et des types d'allocation des ressources à la production se fait en étudiant le lien entre les inputs et les outputs. Ainsi, les économistes ont recours à la notion d'efficience pour tenir compte du critère de maximalité du produit, d'une part, et de la possibilité d'une utilisation minimale des moyens de production, d'autre part.

Les premiers à travailler sur le concept d'efficience sont Koopmans (1951), qui a proposé une mesure du concept de l'efficience, et Debreu (1951), qui l'a mesuré empiriquement. En 1957,

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

c'est à Farrel à qui revient la primeur d'avoir défini clairement le concept d'efficience économique et d'avoir distingué les concepts d'efficience technique et d'efficience allocative. Il a également proposé une approche pour estimer les frontières d'efficience ou "best practice envelope" pour une activité donnée. En agriculture, l'efficience traduit le comportement non gaspillant des ressources disponibles en eau, terre et capital pour obtenir les meilleurs résultats, en utilisant des technologies données. Piot-Lepetit et Rainelli, (1996) affirment que les écarts possibles entre le niveau maximum de production, sous les contraintes subies par les agriculteurs, et la réalité, sont sensibles et montrent l'existence d'importantes marges de manœuvre.

La notion d'efficience présente trois composantes qui sont : l'efficience technique, l'efficience allocative et l'efficience économique (Piot-Lepetit et Rainelli, 1996; Bravo-Ureta et Pinheiro, 1997; Coelli et al., 1998).

1.4.2.1 Efficience technique

Pour Farrell (1957), l'efficience technique mesure la manière avec laquelle une firme utilise les quantités d'inputs qui entrent dans le processus de production. Une exploitation est techniquement efficiente si, pour un niveau de facteurs et de produits utilisés, il est impossible d'augmenter la quantité d'un produit sans augmenter la quantité d'un ou de plusieurs facteurs ou sans réduire la quantité d'un autre produit. La mesure de l'efficience technique d'une activité de production permet de voir si cette dernière peut augmenter sa production sans pour autant consommer plus d'intrants, ou diminuer un intrant au moins, tout en conservant le même niveau de production (Amara et Romain, 2000).

1.4.2.2. Efficience allocative

L'efficience allocative exprime la manière avec laquelle une exploitation agricole, ou toute autre unité de production, choisit les proportions des différents inputs par rapport aux prix du marché. C'est la combinaison optimale, ou l'utilisation des facteurs dans les meilleures proportions, étant donné leurs prix relatifs (Amara et Romain, 2000).Une exploitation est donc déclarée allocativement efficiente si, à un niveau de production donné, le coût des facteurs est minimal.

1.4.2.3. Efficience économique

L'efficience économique ou "efficience totale" est déterminée conjointement par l'efficience technique et l'efficience allocative. Elle correspond aux produits de ces deux types d'efficience (Coelli et al., 1998). Une exploitation agricole est considérée économiquement efficiente si elle est à la fois techniquement efficiente et alloue de manière efficiente ses ressources productives. La Figure 3 ci-dessous, proposée par Farrell (1957), présente une illustration des types d'efficience. L'isoquant SS' représente la frontière de production. La droite (AA') représente graphiquement le rapport des prix des inputs déterminés par le marché. Selon Farrell (1957), l'efficience technique de l'exploitation au point P est donnée par le rapport OQ/OP et l'efficience allocative par le rapport OR/OQ. Tous les points situés sur la frontière de production sont techniquement efficients, et ont une efficience technique égale à 1. Chacune des exploitations aux points P et E est techniquement efficiente, mais l'exploitation au point E a une efficience allocative égale à 1. L'efficience économique correspond à l'efficience technique et à l'efficience allocative réunies. La mesure de l'efficience, dans la littérature économique, se limite généralement au calcul de l'efficience technique (Bravo-Ureta et Pinheiro, 1997; Nyemeck et al., 2004).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

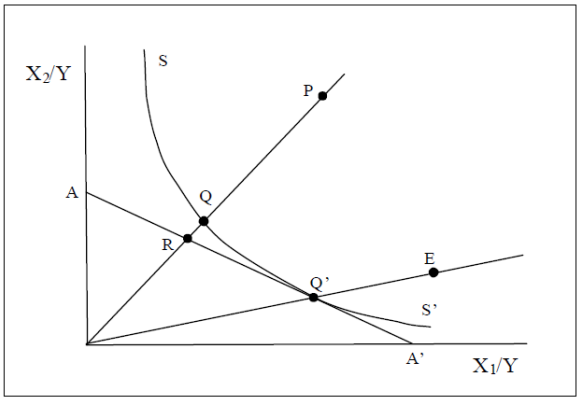


Figure 3. Représentation graphique (Farrell 1957) de l'efficience technique et de l'efficience allocative: cas de deux inputs et un output

(Coelli et al., 1996).

1.4.2.4. Méthodes d'estimation de l'efficience

Dans la littérature économique, les méthodes d'estimation de la frontière de production peuvent être classées selon la forme prévue de la frontière, selon la technique d'estimation utilisée pour l'obtenir, et selon la nature de l'écart entre la production observée et la production optimale (Albouchi et al., 2005). Par ailleurs, on note qu'il est possible de synthétiser les différentes méthodes d'estimation de l'efficience en deux approches : l'approche non paramétrique (A) et l'approche paramétrique (B). La première considère que la frontière efficiente est déterminée en fonction des meilleures unités de l'échantillon, tandis que la seconde considère une fonction d'efficience connue à priori.

A. L'approche non paramétrique

i) Fondement de l'approche non paramétrique

L'approche non paramétrique est de type déterministe; elle a été introduite par Farrel en 1957 et développe de manière simultanée les deux étapes suivantes (Piot-Lepetit et Rainelli, 1996; Coelli et al., 1998) :

> Etape 1 : à partir d'un ensemble d'observations sur un ensemble d'exploitations, chacune est comparée aux autres; une frontière de production est représentée par les exploitations techniquement efficaces; sur cette frontière aucune exploitation ne produit plus avec une quantité moindre d'intrants. Dans le cas contraire, elle est incluse dans l'ensemble des possibilités de production et est déclarée d'une certaine inefficience technique, d'où son nom d'approche déterministe.

> Etape 2 : C'est la mesure de l'écart qui existe entre chacune de ces exploitations et la frontière de production qui permet de calculer le score d'efficience de chaque exploitation. Les valeurs des scores sont comprises entre 0 et 1. Ce score d'efficience sera d'autant plus faible que la représentation de l'exploitation est éloignée de la frontière de production.

L'approche non paramétrique se base sur la méthode d'enveloppement des données (DEA), ci-dessous présentée.

ii) La méthode DEA

La méthode DEA (Data Envelopment Analysis), initialement introduite par Charnes et al. (1978), a permis d'étendre l'analyse de l'efficience technique à des situations mettant en jeu plusieurs produits et de rendements d'échelle non constants.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

D'après cette méthode, la frontière est construite par la technique de la programmation linéaire. Le terme "envelopment" est utilisé pour désigner l'hypothèse selon laquelle la frontière de production enveloppe toutes les observations.

La méthode DEA évalue l'efficience relative des unités de production à partir des informations sur les inputs et les outputs des organismes de production (Kobou et al., 2009). Elle est fondée sur la programmation linéaire et permet d'identifier des fonctions de production empiriques. La frontière d'efficience est déterminée en se basant sur les meilleures pratiques. Elle permet donc d'identifier un ensemble d'unités de productions efficientes pouvant servir de référence pour les organismes inefficients.

Dans la littérature, les deux variantes de la méthode DEA les plus employées sont : le modèle CCR (Charnes et al., 1978) et le modèle BCC (Banker et al., 1984). Le premier suppose les rendements d'échelles constants (CRS- Constant Returns to Scale- model); une augmentation dans la quantité d'input consommé mènera à une augmentation proportionnelle dans la quantité d'output produit. En revanche, le deuxième suppose les rendements d'échelles variables (VRS-Variable Returns to Scale- model);la quantité d'output produit découle d'une augmentation non proportionnelle des inputs. La différence de mesure d'efficience entre les deux modèles donne l'efficience d'échelle.

B. L'approche paramétrique

Fondement de l'approche paramétrique

L'approche paramétrique peut être classée en deux grandes catégories : (i) si tout écart observé est uniquement dû à l'inefficience, la frontière de production est dite *déterministe.* (ii) Si, par contre, en plus de la défaillance technique, on prend en compte des termes aléatoires tels que les erreurs de mesure, de la mauvaise spécification du modèle ou la considération d'autres facteurs qui ne sont pas sous le contrôle des agriculteurs, la frontière de production devient alors *stochastique.*

L'approche paramétrique et déterministe a fait l'objet de sérieuses critiques. En plus de la nature déterministe de la frontière de production qui est dictée, cette approche est très sensible aux observations extrêmes et suppose un certain nombre d'hypothèses vu qu'elle attribue une forme fonctionnelle à la frontière de production.

C. Approche paramétrique "versus" approche non paramétrique

L'objectif est de présenter une analyse comparée des approches paramétrique et non paramétrique des frontières de production, en essayant d'identifier les points forts et les points faibles de chaque approche.

Contrairement à l'approche paramétrique, basée sur un modèle concrétisé par l'utilisation d'une forme fonctionnelle particulière, l'approche non paramétrique utilise moins d'informations et les résultats devraient être moins précis. Cependant, l'approche paramétrique présente le risque d'influencer les résultats en imposant une forme fonctionnelle qui n'est pas la plus appropriée (Nodjitidjé, 2009). Alors que l'approche paramétrique englobe les deux frontières, déterministe et stochastique, l'approche non paramétrique attribue toutes les inefficacités à l'agriculteur. Cependant, Bravo-Ureta et Rieger (1990) ont affirmé que, lorsque le but de l'étude est de déterminer si une exploitation agricole est efficiente ou non, l'utilisation d'une frontière déterministe ou une frontière stochastique conduit à la même conclusion générale. De plus, Romain et Lambert, (1995) ont affirmé que, si l'objectif de l'étude n'est pas le calcul du niveau absolu de l'efficience, mais plutôt l'identification des facteurs qui déterminent l'efficience des ces exploitations, le choix de la méthode d'estimation n'est pas primordial.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Après cette analyse bibliographique, nous pouvons déduire que les dimensions hydraulique, agronomique et économique, prises séparément, réduisent la complexité des systèmes irrigués du fait de leur approche d'une seule dimension. Dépourvues de l'analyse de l'interaction entre elles, ces dimensions spécifiques ne peuvent ainsi répondre que partiellement aux enjeux actuels de l'agriculture irriguée.

1.5. Dimension transdisciplinaire de la performance

Depuis quelques années, et à l'échelle d'une entreprise quelconque, la performance n'est plus limitée seulement à la seule dimension financière. En effet, la pérennité des entreprises dépend de la manière dont elles se conduisent et de la responsabilité qu'elles engagent vis-à-vis de l'ensemble de leurs parties prenantes. C'est dans ce contexte qu'apparaît le concept de performance globale (synthétique ou holistique). Ce concept naît avec l'apparition du développement durable et prend en compte la responsabilité sociétale de l'entreprise vis-à-vis de ses parties prenantes. La difficulté est de bien répondre à l'enjeu de la mesure: comment identifier des indicateurs peu nombreux, simples, fiables et partagés avec toutes les parties prenantes?

Dans le secteur agricole, les systèmes irrigués mettent en jeu des processus complexes et en interaction entre eux. Ces processus sont d'ordre social, politique, technique, économique et environnemental, et il est important d'analyser la performance en tenant compte de ces différents processus. La performance de ces processus convertissant des inputs en outputs était le sujet de recherche de plusieurs études (Bottral, 1981; Zhi,1989; Oad et McCornick, 1989; Abernethy, 1990; Makin et al., 1990; Molden et Gates, 1990; Small et Svendsen, 1992; Murray-Rust et Snellen, 1993; Rao, 1993; Smedema et al., 1996; Bos, 1997; Burt et Styles,1999; Vincent et al., 2002). La comparaison de la performance des systèmes irrigués est au cœur du procédé appelé benchmarking qui a été utilisé principalement par International Water Management Institute (Perry, 1996; Molden et al.,1998; Kloezen et Garces-Restrepo, 1998; Sakthivadivel et al., 1999). Dans la littérature, le benchmarking est un moyen de juger et par la suite améliorer la performance relative aux clés de la concurrence (Camp, 1989 ; Bogan et English, 1994;Wild, 1999). L'étude des outputs et le processus utilisé pour les obtenir permettent aux organisations d'adopter les meilleures pratiques pour améliorer leurs propres performances (Malano et al, 2004). L'approche du benchmarking, dans le secteur de l'irrigation, suppose que le service de l'irrigation met en opération un environnement naturel, que l'irrigation met en jeu différents processus (physique, social, économique, politique, technique et environnemental) complexes et en interaction, et que la performance des systèmes irrigués est spécifique au site (Malano, 2004).

Le processus "rapid appraisal process (RAP)", introduit par FAO/IPTRID/World Bank publication Water Reports-19 est une partie clé du benchmarking où différents indicateurs (internes et externes) hydrauliques, agronomiques, économiques et environnementaux ont été produits (Burt et Styles, 1999). En général, le processus d'interprétation permet d'examiner les efficiences d'irrigation qui dépendent de la qualité du service de distribution de l'eau. Le benchmarking identifie donc les facteurs critiques de succès d'une organisation pour atteindre ses objectifs, donc sa performance (Goodstein et al., 1993).

Dans le secteur agricole, pour tenir compte de la performance hydraulique (gestion de l'eau), de la performance agronomique (productivité de la terre) et de la performance économique (productivité du capital), il est nécessaire de viser un compromis entre toutes ces dimensions. La résolution de ce compromis revient à optimiser une fonction mettant en relation les facteurs de productions mobilisés (eau, terre, charges variables), rendant possible la simulation de scénarios et la quantification de leurs effets sur la valorisation des différents facteurs de production. Nous présentons ci-après le cadre théorique pour répondre à cette problématique.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1.5.1. Cadre théorique des questions d'optimisation

En théorie de la production, c'est l'approche primale, qui consiste à l'optimisation d'un problème économique sous un ensemble de contraintes, qui a conduit les premiers travaux empiriques concernant les structures de production. La programmation mathématique est une technique de résolution des problèmes d'optimisation sous contraintes. Ces contraintes, qui sont de différentes natures (disponibilités de ressources naturelles, disponibilité des investissements, questions de marché, …), ne sont pas faciles à identifier. De plus, les décisions publiques pour une amélioration de performance se posent à l'échelle du périmètre; mais le passage de l'analyse de l'échelle de l'exploitation à celle du périmètre introduit un biais du fait de la diversité des exploitations agricoles.

La typologie permet de classifier les exploitations en groupes homogènes, chacun d'eux étant représenté par une exploitation type. Un modèle individuel peut être fait sur chaque exploitation type de chaque classe. Les résultats obtenus pour chaque classe peuvent être agrégés vers le périmètre irrigué en considérant l'effectif de chaque classe comme coefficient de pondération. Mais cette approche présente encore le problème du biais de l'agrégation et de la représentativité. De plus, avec la représentation primale, la fonction de production est une relation technique entre les inputs et les outputs physiques, et son optimisation ne présente aucune notion économique.

L'approche duale est alors une alternative. Cette approche est présentée dans (Gopinath et Kennedy, 2000) : elle mène à une fonction objective qui ne dépend que des variables exogènes (prix des inputs et des outputs). Cette fonction englobe la question d'optimisation et les possibilités de production.

1.5.2. Caractérisation de la fonction de revenu duale

Contrairement à la fonction de production qui se résout par un calcul en termes de quantités, la fonction de revenu duale peut résoudre un problème économique qui consiste à évaluer et comparer des moyens de natures différentes. Les termes qu'introduit une fonction duale dépendent de l'objectif. En se référant à notre cas, les résultats de l'analyse de la demande faite au chapitre 3 ont montré que l'offre du réseau ne peut fournir que 65% des besoins en eau d'irrigation. De même, les résultats du chapitre 4 et du chapitre 5 ont montré la faible efficience hydraulique et de l'utilisation d'eau à l'échelle de la parcelle.

La question qui se pose alors est d'identifier le levier sur lequel on peut agir, sous une contrainte d'un volume d'eau limité, pour améliorer le revenu de l'agriculteur, d'une part, et améliorer la résultante des efficiences d'utilisation de l'eau, de la terre et des charges variables, exprimée par le niveau d'efficience, d'autre part. La fonction duale doit donc avoir trois arguments : (i) le système des prix des inputs et des outputs, (ii) le volume d'eau disponible et (iii) le niveau d'efficience (θ). Pour cela, la fonction duale globale doit maximiser le revenu de l'agriculteur selon l'équation ci-dessous pour répondre à l'argument (i) :

$$Max\ r = \sum_i PiYi - \sum_j WjXj$$

r : revenu qui ne prend pas en considération les facteurs fixes

P : prix de l'output i

Y : quantité de l'output i

W : prix de l'input j

X : quantité de l'input j

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

A l'optimum,

$Y_i^* = yi(Pi, Wj)$, $X_j^* = xj(Pi, Wj)$ et $r^* = \sum_i PiYi(P,W) - \sum_i WjXj(P,W)$

A l'optimum, la fonction de revenu indirecte r* ne dépend que du vecteur prix des facteurs et celui des variables. Pour répondre aux arguments (ii) et (iii), la fonction de revenu duale globale sera r (P, V, θ). Ainsi, cette fonction relie le vecteur prix des inputs et celui des outputs propres à chaque exploitation (P), le vecteur des dotations en eau d'irrigation (V) ainsi que le niveau d'efficience de chaque exploitation (θ). Le passage d'un modèle empirique à un modèle estimable à partir de données réelles nécessite une forme fonctionnelle. Puisque la maximisation revient à prendre les dérivées par rapport aux prix de l'input et de l'output, cette forme fonctionnelle doit bien se prêter aux manipulations mathématiques, tel que le calcul de dérivées, et ne doit pas poser de problèmes statistiques dans l'estimation des paramètres. Gopinath et Kennedy (2000) ont proposé la spécification Translog. L'estimation des paramètres de la fonction Translog permet de simuler différent scénarios et de calculer leurs effets sur la valorisation des différents facteurs de production. L'évaluation de ces effets exige le calcul des contributions des différents input j et output i dans le revenu en situation actuelle d'équilibre et de déterminer comment varient ces contributions lors du passage de la situation actuelle vers la situation simulée du scénario. A la fin de ces étapes, il est possible de déterminer les variations du revenu global associé à chaque scénario.

Pour appliquer cette approche duale, une base de données importante est nécessaire pour l'estimation des paramètres de la fonction de revenu duale. Cette base de données étant limitée, on a procédé, dans ce travail, à l'approche primale en définissant des modèles individuels faits sur les exploitations types de chaque classe dégagées au (ch.3 § 3.3.2). Ces modèles ont été agrégés vers le périmètre irrigué en considérant l'effectif de chaque classe comme coefficient de pondération.

1.6. Conclusion

De nombreux travaux ont été conduits pour étudier les performances des systèmes irrigués selon des approches mono disciplinaires ou multidisciplinaires. Chaque approche a ses objectifs et ses limites.

La dimension hydraulique a abordé la performance en se limitant à l'élaboration d'indicateurs qui évaluent généralement l'efficience et la distribution de l'eau d'irrigation, en plus des questions d'équité et d'adéquation. Bien que ces indicateurs soient importants à évaluer, il est nécessaire d'étudier l'objectivité de la dimension hydraulique par rapport à d'autres dimensions à différentes échelles. Quant à la dimension agronomique, les travaux ont pris en compte la réponse des rendements à différentes pratiques et contraintes (eau en quantité et en qualité). Cette dimension se fie souvent à la présentation de normes à appliquer sans une analyse objective des pratiques d'adaptation des agriculteurs aux différentes contraintes. Il découle de cette analyse bibliographique, que toute amélioration de la performance des systèmes irrigués nécessite la mise en œuvre d'une démarche conciliant les différentes dimensions constitutives du système, à savoir les dimensions agronomique, économique et hydraulique, où les pratiques réelles et les contraintes spécifiques du milieu doivent être considérées.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 2: Les périmètres irrigués de la basse vallée de la Medjerda: Une situation actuelle préoccupante

La basse vallée de la Medjerda constitue une zone d'étude. Le périmètre de Borj Toumi, support de cette étude, reflète la relation typique entre les ressources disponibles pour produire et la réalisation des objectifs économiques. De plus, il offre une grande diversité en aménagements hydrauliques. Ces facteurs rendent l'étude de ce cas pertinente pour d'autres périmètres dans l'évaluation de la performance.

2.1. Périmètres irrigués de la vallée de la Medjerda : historique

La vallée de la Medjerda a constitué depuis longtemps un espace riche pour le développement de plusieurs activités agricoles diversifiées. Depuis le 16ème siècle, les Andalous ont fortement marqué la région par l'introduction de nouvelles techniques culturales, des techniques d'irrigations et l'aménagement de l'espace pour une meilleure adaptation aux contraintes climatiques et géophysiques. Ceci a été renforcé par la présence coloniale en modernisant l'agriculture dans ses différents aspects comme la mécanisation, l'organisation de la production agricole et l'organisation technique et communautaire de l'irrigation. La réforme agraire de 1958 a mis en valeur la région de la vallée de la Medjerda par la création d'un grand périmètre irrigué géré par les services de l'Etat (Office de Mise en Valeur de la Vallée de la Medjerda) OMVVM. Cette politique a, en effet, contribué à l'installation d'une nouvelle configuration sociale et économique par la fixation de la population, l'allocation des terres agricoles pour une paysannerie pauvre et l'expansion de l'agriculture en irriguée, (DGGTH, 2001).

La vallée de la Medjerda, comprend toute la région située entre Porto-Farina, Borj Toumi, Ain el Asker et Tunis, soit 260 000 ha environ. Le programme de mise en valeur de ces terres, mené durant les années 60, a prévu l'irrigation de 50 000 ha (Leca et al., 1956). Durant cette période, les agriculteurs reprochaient aux fonctionnaires, en général, "de faire de l'agriculture avec de l'argent au lieu de faire de l'argent avec l'agriculture". Pour cela, des formations et des conférences ont été organisées au profit des agriculteurs. On cite la conférence du 23 décembre 1955 à Tébourba qui a groupé 600 fallahs. En plus, de nouveaux matériels agricoles, tels que la charrue-taupe, les tuyaux d'irrigation par aspersion, etc… ont été mis à la disposition des agriculteurs, à titre d'essai ou de vulgarisation. Afin de permettre la réalisation d'un programme rationnel de mise en culture, un recensement a été fait en 1956, qui portait, pour chaque secteur irrigable, sur le plan parcellaire, la situation culturale et la vocation des terres, notamment. Des investissements importants ont été consentis pour la réalisation de gros ouvrages en béton et des travaux de terrassement formant en quelque sorte l'outil de mise en valeur. Le but final de ce projet était la transformation agricole des terres qui restait une question nuancée et qui présentait des difficultés nombreuses, parmi lesquelles les charges des agriculteurs, l'orientation agricole,… L'agriculteur devait prendre en charge l'aménagement intérieur de son exploitation (nivellement, canaux de distribution…). Vu la topographie du terrain, le coût de l'aménagement de l'hectare était élevé, ce qui a fait apparaitre dès le départ des difficultés pour un petit agriculteur, ne disposant pas de moyens financiers, pour réaliser cet aménagement. En plus, depuis les années 60, les agriculteurs se plaignaient des coûts prohibitifs des aménagements et du prix trop élevé de l'eau. Or, certains agriculteurs, dont les terres sont situées à une cote supérieure à celle du canal d'irrigation de la basse vallée de la Medjerda, procédaient au repompage de l'eau par leurs propres moyens, afin d'irriguer les cultures. On en déduit que ces agriculteurs réalisaient des bénéfices suffisants pour leur permettre de supporter des frais de pompage supplémentaires.

Compte tenu des études pédologiques et de la qualité de l'eau, un programme de transformation agricole a été étudié et les cultures les plus rentables ont été choisies pour chaque secteur. Mais ce choix ne dépendait pas seulement de la terre et de l'eau, il était

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

également fonction des possibilités d'écoulement. Sur les périmètres de la vallée de la Medjerda, il était prévu de cultiver entre le tiers et la moitié de la superficie agricole. Parmi les cultures qui ont été prévues, on cite en premier lieu les cultures fourragères, en vue du développement de l'élevage et des fumiers, qui n'ont pas une rentabilité importante directe mais des conséquences positives sur les terres en raison de leur pouvoir régénérateur des sols. Il était prévu que les fourrages occupent 25% des superficies pour éviter l'épuisement des terres.

2.2. Infrastructure hydraulique et gestion de l'eau

La Medjerda, le cours d'eau le plus important, qui se situe entre une altitude de 1712 m et le niveau de la mer et parcourt 465 km avec un apport annuel de 1 milliard de m³ (DGETH, 2001), se caractérise par des crues très violentes qui font sortir l'oued de son lit mineur. Le bassin de la Medjerda couvre 21 000 km².

Les eaux disponibles dans la Medjerda sont relevées à la cote 37.5 m par le barrage de Taullierville El Aroussia et desservent les périmètres au moyen d'un grand canal ayant un débit de 13 m³/s et par l'intermédiaire d'une station de pompage sur la retenue même du barrage avec un débit de 1m³/s. Cette armature, barrage et grand canal, constitue le support du système d'irrigation dont les unités primaires sont les réseaux. Leur division est commandée par des points de départ obligatoires et par des conditions topographiques. Dans leurs parcours au sein des périmètres, les deux branches du grand canal déterminent une zone intérieure, d'une superficie de 27 000 ha, où la distribution de l'eau d'irrigation est faite gravitairement, et une zone extérieure, d'une superficie de 23 000 ha, où la distribution de l'eau d'irrigation n'est réalisable que par pompage, effectué par huit stations de pompage, à partir desquelles s'effectue le refoulement de l'eau prélevée dans le grand canal.

Pour la commodité de la distribution de l'eau en tête des exploitations à irriguer, le débit disponible dans le canal est fractionné en unités de 5 l/s, 10 l/s ou 15 l/s. Ces débits sont obtenus grâce à des appareils de mesure (module à masque) de précision satisfaisante. La seule exigence de ces appareils, pour assurer un fonctionnement correct, est d'être placés dans des sections de canaux où le niveau de l'eau est maintenu quasi-constant.

Suivant la vocation du sol, un débit fictif continu a été prévu pour chaque vocation : il est de 0.25 l/s.ha pour la vocation fruitière, de 0.43 l/s.ha pour la vocation fruit/ maraîchage, de 0.6 l/s.ha pour la vocation maraichage/fourrage ou maraichage et de 0.35 l/s.ha pour une vocation fourragère.

Durant les années 60, d'importants investissements publics ont été consentis pour l'introduction de la grande hydraulique. Ceci a engendré une extension importante des superficies des périmètres publics irrigués. La gestion de l'eau était assurée par l'Etat. Elle a été d'abord confiée à l'Office de Mise en Valeur de la Vallée de Medjerda (OMVVM) de 1958 à 1970, puis 12 Offices de Mise en Valeur Agricole (OMIVA) ont été créés entre 1970 et 1980. Cette gestion étatique a prouvé ses limites surtout lorsque les pannes devenaient fréquentes. Des réformes fondamentales dans le secteur de l'eau on eu lieu en 1990, la plus importante étant la dissolution de tous les Offices -établissements publics à caractère industriel et commercial- gestionnaires directs des périmètres publics irrigués, en fusionnant leur fonction avec celle de Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) -établissement public à caractère administratif-. L'application de cette politique de décentralisation s'est accompagnée d'une politique de création d'associations des usagers de l'eau: Associations d'Intérêt Collectif (AIC) puis Groupements de Développement Agricole (GDA). Il est alors laissé aux exploitants d'organiser la gestion de l'eau entre eux pour éviter des problèmes de coordination. Cette nouvelle situation a entrainé l'émergence de diverses stratégies d'alliances, de conflits et de tensions pour la gestion de l'eau.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

2.3. Une situation actuelle préoccupante

En 1999, une étude stratégique sur le secteur de l'eau a été élaborée et a débouché, entres autres, sur l'identification d'un " Projet d'Investissement dans le Secteur de l'EAU (PISEAU)" comportant diverses actions et sous-projets auxquels plusieurs bailleurs de fonds se sont intéressés. Parmi ces sous-projets, la modernisation des périmètres publics irrigués de la basse vallée de la Medjerda a occupé une place importante, et le principe de réaliser une étude de faisabilité de ce projet sur 5 500 ha environ, a été retenu comme première tranche d'intervention. Ce projet entrait dans le cadre de la politique d'appui à la production agricole, la gestion intégrée des ressources naturelles, la stratégie nationale d'économie d'eau et la promotion d'Associations d'Intérêt Collectif (AIC), actuellement convertis en Groupement de Développement Agricole (GDA). Cette étude a montré que sur les secteurs étudiés, seulement 30% de l'allocation en eau est exploitée (SCET-TUNISIE et HYDROPLAN, 2002). Mais, d'autre part, la consommation actuelle en eau se situe autour de 2000 m³/ha en moyenne, valeur faible comparée aux normes de besoins en eau; ceci se répercute sur les rendements et par suite sur la valorisation des ressources en eau et en sol du périmètre. En plus la vente d'eau à partir du réseau collectif sur la zone d'étude a connu une chute de 1984 à 2001 comme le montre la Figure 4. Cette baisse de vente d'eau, qui est passée de 2000 m³/ha/an à 1000 m³/ha/an, peut être expliquée soit par une orientation vers le pompage privé, effectué peut-être d'une manière qui n'optimise pas les objectifs de la communauté, entrainant donc une mauvaise valorisation des périmètres dans lesquels l'Etat a fortement investi, soit par une grande différence entre le volume facturé et le volume effectivement pompé.

Malgré les potentialités naturelles intéressantes et l'environnement général favorable, les périmètres de la basse vallée de la Medjerda ont des contraintes qui s'opposent à sa mise en valeur. Sur le plan agronomique, le problème d'écoulement des productions périssables a conduit à privilégier partout des cultures présentant un écoulement assuré tel que l'olivier et le blé. En plus de l'écoulement assuré, ces deux cultures moins sensibles au stress hydrique permettent de surmonter les problèmes rencontrés dus aux effets de "bouts de réseau". Sur le plan socio-économique, une crainte s'est manifestée vis-à-vis des opérations des structures de développement communautaire (comme le GDA), suite au désengagement de l'état de la gestion de la distribution de l'eau. De plus, quelques grands agriculteurs avec leurs moyens profitent de la désorganisation des petits et moyens agriculteurs. Sur les périmètres touchés par le plan de modernisation, le revenu net moyen des exploitations familiales est modeste et des exploitations non viables existent sur 8% de la superficie. Sur cette zone, seulement 43% des exploitants ont un titre de propriété leur permettant de fournir des garanties pour obtenir un appui du système bancaire. (SCET-TUNISIE et HYDROPLAN, 2002).

La gestion participative de l'eau se trouve compliquée par plusieurs phénomènes. On pense souvent, à tort, que le changement de la gestion de l'eau d'une structure étatique vers le niveau local est une condition déterminante de son succès. Cette idée repose, théoriquement, sur le principe que l'organisation locale, émanée des communautés villageoises ou locales, va nécessairement satisfaire leurs besoins et faire converger les acteurs vers un intérêt commun. En fait, au plan institutionnel, la relation difficile entre les exploitants et le Groupement de Développement Agricole (GDA), rend l'organisation des exploitants autour d'objectifs communs difficile. Par ailleurs, les membres du GDA placent parfois leur intérêt personnel avant l'intérêt collectif, de sorte qu'ils perdent la confiance des exploitants. Ceci dilue le pouvoir des exploitants dans la gestion participative de l'eau et empêche de résoudre les problèmes de coordination. Cette gestion a créé des inégalités entre exploitants, et a souvent renforcé les inégalités de distribution de l'eau. Cette situation a conduit les producteurs à développer des stratégies, en particulier pour l'accès à l'eau, de plus en plus individualistes.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

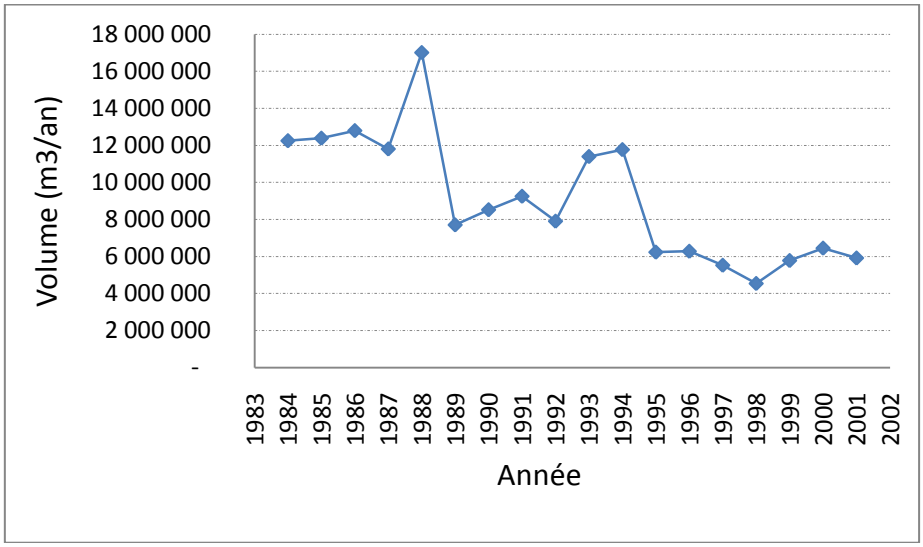


Figure 4. Évolution de la vente d'eau sur la superficie à moderniser (5500 ha)

Source : (SCET-TUNISIE et HYDROPLAN, 2002).

2.4. Le périmètre irrigué de Borj Toumi: un système hydraulique contrasté

Le périmètre irrigué dénommé Tongar porte le nom du village de Borj Toumi qui, administrativement, appartient à la délégation de Tébourba, dans le gouvernorat de la Manouba au nord de la Tunisie. C'est une délégation orientée vers l'activité agricole où la taille moyenne des exploitations est la plus faible. Ce périmètre constitue le terrain d'étude pour ce travail de recherche.

Le périmètre de Borj Toumi est limitrophe à la Medjerda au niveau du barrage de prise de Taullierville El Aroussia à 10 km en amont de Tébourba. La pluviométrie moyenne de la zone est comprise entre 400 et 450 mm/an alors que l'ETP est de 1400 mm/an.

Il s'étend sur une superficie nette irrigable de 785 ha, dont la mise en eau date de 1966. Ce périmètre a subi une extension au cours de son histoire. Il est desservi en eau par l'intermédiaire d'une station de pompage sur la retenue même du barrage avec un débit de 1m³/s. La distribution de l'eau se fait selon deux modes différents :

- un secteur de distribution gravitaire (secteur G), sur demande (où la distribution se fait suivant une règle de collectivité), couvrant une superficie nette irrigable de 425 ha. Sur ce secteur, il était prévu de pratiquer les cultures maraichères et l'arboriculture fruitière par la technique de l'irrigation de surface. Le débit fictif continu est de 0.43l/s.ha.
- un secteur de distribution sous pression (secteur P), à la demande, couvrant une superficie nette irrigable de 360 ha. Le tertiaire n'est pas alimenté en continu. Sur ce secteur, il était prévu de pratiquer les cultures maraichères et les cultures fourragères par des techniques d'aspersion. Le débit fictif continu est de 0.6 l/s.ha.

Sur le secteur de distribution gravitaire, le réseau d'irrigation est composé de conduites à ciel ouvert munies de modules à masques au niveau de chaque exploitation. Sur le secteur de distribution sous pression, le réseau d'irrigation collectif est enterré, chaque exploitation étant équipée d'une vanne et d'un compteur sans limiteur de débit.

La courbe d'évolution du volume d'eau facturé en m³ du périmètre depuis sa mise en eau jusqu'à l'année 2005 montre une grande fluctuation (Figure 6). Cette fluctuation peut être en partie expliquée par la pluviométrie de la campagne correspondante ainsi que par la modification importante de la tarification survenue en 1991 avec le changement de la gestion de l'eau agricole.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

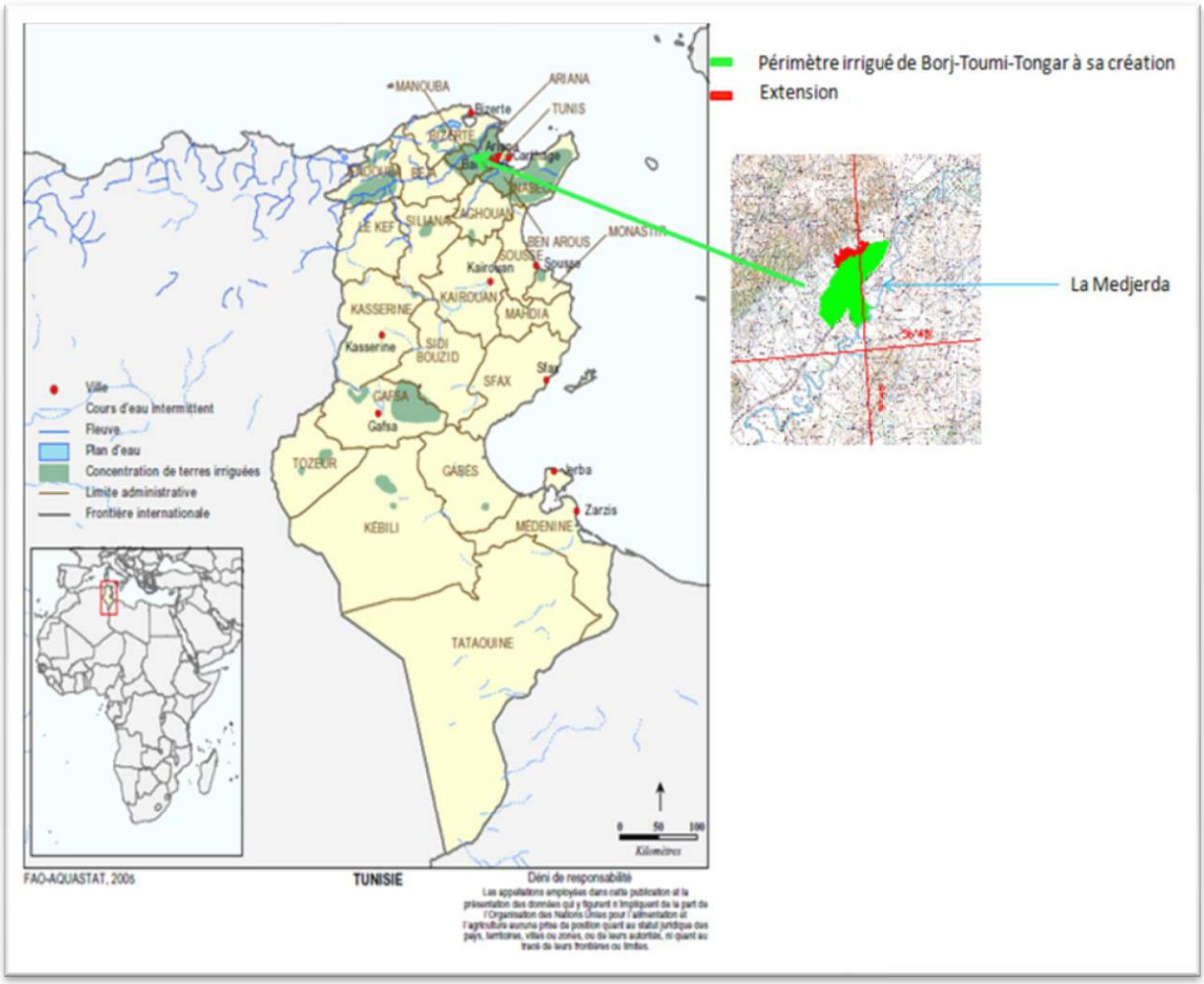


Figure 5. Localisation du périmètre irrigué de Borj-Toume-Tongar (Tunisie)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

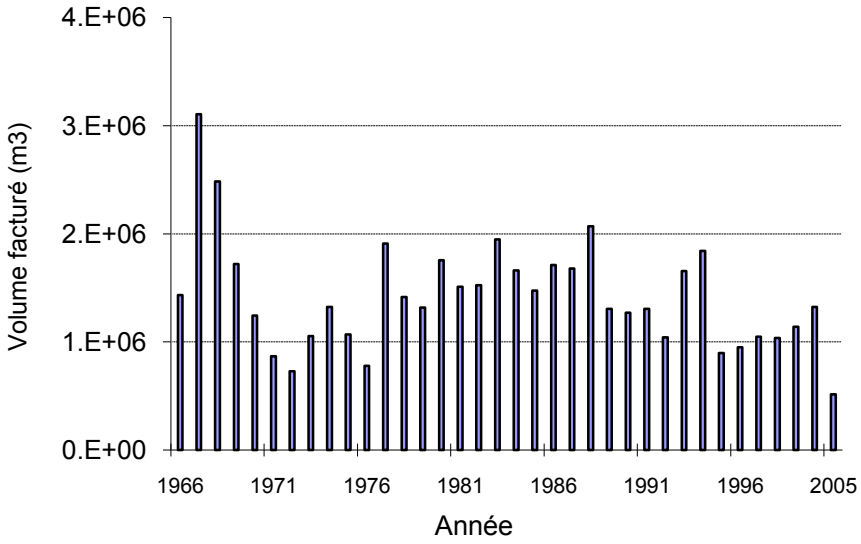


Figure 6. Évolution du volume d'eau pompé sur le périmètre Borj Toumi-Tongar

Source : Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) de la Manouba

2.5. Conclusion

Les périmètres de la basse vallée de la Medjerda représentent une grande ressource en eau et en sol. Cependant, et malgré les importants investissements réalisés dans les infrastructures, des disfonctionnements subsistent. Une meilleure connaissance de la situation actuelle des exploitations ainsi que la compréhension de leur fonctionnement hydraulique, agronomique et économique s'avère donc nécessaire en vue d'améliorer leur performance et par conséquent une meilleure valorisation des ressources naturelles en eau et en sol, tout en assurant une meilleure situation économique de l'exploitation agricole. La question de la durabilité, qui se pose aussi à propos de ces systèmes, peut s'analyser à travers l'évaluation des performances des systèmes irrigués. La compréhension des niveaux de performances des différents systèmes de production dans des conditions contrastées d'accès à la ressource est une condition essentielle pour pouvoir mener des analyses prospectives sur l'agriculture irriguée.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 3 : Evaluation et analyse de la demande en eau dans le périmètre de Borj Toumi-Tongar

Ce chapitre constitue une phase de diagnostic et de typologie des exploitations qui ont permis l'évaluation et l'analyse de la demande en eau, et ce, pour dégager les contraintes de l'offre de l'eau en relation avec la performance des systèmes irrigués. Il a fait l'objet d'un article publié: Hanafi, S., Mailhol, J.C., Poussin, J.C., Zairi, A., 2011. Estimating water demand at irrigation scheme scale using various levels of knowledge: applications in northern Tunisia. *Irrigation and Drainage* DOI: 10.1002/ird.652

3.1. Introduction

Nous procéderons dans ce chapitre à une analyse des besoins en eau des cultures installées dans le périmètre support de notre étude, Borj Toumi-Tongar. Pour cela, le recours à une démarche agropédoclimatique nous permettra d'établir un point de référence sur ces besoins en eau puis de définir un ordre de grandeur du volume brut nécessaire, et le confronter avec la capacité du réseau de distribution. Cette confrontation prend son intérêt durant le mois de pointe qui est le mois de juillet.

Sur ce périmètre, et comme sur plusieurs anciens périmètres irrigués de la Medjerda, l'introduction de nouveaux équipements au sein des exploitations, conjuguée avec le changement des systèmes de culture, est à même d'influencer les modes de gestion de l'eau. Il est intéressant dans ce cas d'étudier la demande en eau agricole compte tenu des choix des agriculteurs qui peuvent être connus au moyen d'un constat. Le constat d'un périmètre irrigué met en œuvre une investigation comprenant une série d'étapes, parmi lesquelles l'étude des réseaux hydrauliques, l'occupation du sol et la capacité du réseau à offrir la demande en eau des cultures, cette dernière constituant une étape fondamentale de ce constat. Une analyse de la demande s'avère donc nécessaire pour rendre plus efficientes les politiques de gestion de l'eau et fournir des données de référence pour la conception, la modernisation et l'exploitation des systèmes de distribution de l'eau (Pulido-Calvo et al.,2009). Les modèles de cultures sont très utiles pour la planification des ressources en eau et la détermination des besoins d'irrigation (Hernemann et al., 2002; Bergez et al., 2002). Ces besoins sont simulés à partir de modèles empiriques (Doorenbos et Pruitt, 1977; Allen et al., 1998). Mais il existe une différence entre les systèmes de culture planifiés par les aménagistes et ceux adoptés par les agriculteurs, qui introduisent leurs propres choix (ICID, 1996). Ainsi, pour mieux analyser la demande en eau, son estimation doit tenir compte des choix des agriculteurs (Poussin et al., 2008).

Des outils spécifiques sont alors nécessaires pour tenir compte des pratiques des agriculteurs dans l'estimation de la demande en eau. Les pratiques d'irrigation utilisées peuvent être obtenues par des enquêtes exhaustives avec les agriculteurs (Maton et al., 2005). Par contre, la description des stratégies d'irrigation à l'échelle d'un périmètre irrigué est difficile vu le nombre et la diversité des exploitations. Considérer chaque exploitation comme unique n'est pas judicieux, d'où l'idée de créer des groupes d'exploitations et de considérer des situations typiques et réelles. Les techniques de statistique multi-variée fournissent un moyen de créer une typologie, particulièrement si une enquête exhaustive est disponible. Pour des groupes homogènes, on peut faire les mêmes recommandations (Byerlee et al., 1980). Les résultats de cette typologie seront utilisés dans l'estimation de la demande en eau à l'échelle du périmètre irrigué objet de notre étude. Cette demande en eau sera confrontée à la capacité du réseau. Les résultats de ce constat constituent un point de départ pour comprendre les contraintes à la performance des exploitations agricoles du périmètre.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.2. Matériel et méthodes

3.2.1. Enquête de structure et typologie des exploitations

Une enquête exhaustive a été menée en 2008 pour identifier la structure des exploitations familiales qui sont au nombre de 82. Cette enquête a porté sur les cultures installées, leurs superficies et les techniques d'irrigations utilisées (de surface, par aspersion ou localisée). Une typologie a été dressée par le biais d'une analyse en composantes principales (Mignolet C. et al, 2001), en utilisant le logiciel SPAD. Le choix des exploitations et des variables objet de cette typologie n'était pas neutre. En effet, 3 exploitations de tailles disproportionnées (100 ha) par rapport à la superficie moyenne des exploitations familiales (7ha) ont été écartées pour éviter les erreurs d'analyse. Dans ce travail, on a considéré que le périmètre irrigué est représenté par l'ensemble des exploitations familiales. Des simulations initiales ont été effectuées pour choisir les variables d'analyse qui sont la superficie agricole utile (Su), la superficie cultivée (Sc), le pourcentage de la superficie en intercalaire (Sin %), la superficie de l'olivier (Soli), de l'arboriculture fruitière (Sor), des cultures maraichères (Scv), des cultures céréalières (Scer), des cultures fourragères (Sfc), le pourcentage des superficies irrigués par des techniques de surface (SG %), par aspersion (SS %), et en localisé (SD %). La typologie représente un modèle basé sur la mobilisation de connaissances issues du terrain, intégrant la diversité des exploitations agricoles afin de bâtir un référentiel technique.

3.2.2. Méthode de calcul de la demande en eau d'irrigation à l'échelle du périmètre

3.2.2.1. Modèle et programmes utilisés

Le modèle PILOTE (Mailhol et al., 1997, Khaledian et al. 2009), qui repose sur la simulation du développement aérien (LAI : Leaf Area Index) et racinaire, est régi par les conditions thermiques et la disponibilité en eau. Ainsi, il résulte de cette approche la production d'un rendement fonction des conditions climatiques et de la disponibilité en eau où le coefficient cultural (Kc) est déduit du LAI. Le rendement peut donc être inférieur au rendement optimal si des stress hydriques apparaissent au cours du cycle cultural. L'avantage de ce modèle est de comporter relativement peu de paramètres, qui peuvent être extraits de la littérature. Des données climatiques journalières d'évapotranspiration (ETP) et de pluies propres à la région étudiée sont nécessaires. Le choix du pas de temps journalier atténue l'importance des variables dynamiques, difficiles à modéliser et permet de privilégier le principe fondamental de conservation de la masse.

Le programme EVAPOT a servi pour le calcul de l'évapotranspiration de référence. Les données d'entrées de ce programme sont journalières: températures minimales et maximales, vitesse du vent, humidité moyenne et rayonnement global. Le programme RGCAL a servi pour le calcul du rayonnement global. Des exemples de sortie du programme EVAPOT et du modèle PILOTE sont présentés en annexe 1 et 2.

3.2.2.2. Données liées au sol

Les échantillons de sol prélevés durant le suivi des irrigations ont servi à différentes analyses des sols du périmètre. Ces analyses concernent les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, la densité apparente et la texture du sol en effectuant une analyse granulométrique par la méthode de 'Pipette de Robinson'. Ces analyses ont porté sur des échantillons prélevés sur des sites différents à 10 profondeurs à pas de 10 cm et ont servi à l'analyse granulométrique. Les résultats de ces analyses sont résumés ci-dessous.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tableau 1. Résultat d'analyse granulométrique du sol

(Valeurs moyennes avec un coefficient de variation < 10%)

Exploitation	A (%)	Lf (%)	Lg (%)	Sf (%)	Sg (%)	Texture
1008	15	17	36	22	3	Limono-argileux
1052	13	19	45	16	1	Limoneux
1053	15	16	33	22	3	Limoneux
1061	13	15	41	22	2	Limoneux
1062	18	15	28	21	4	Limoneux
1063	15	16	39	21	4	Limoneux
1064	17	17	31	25	4	Limoneux
1068	14	18	39	21	3	Limoneux

A : argile, Lf : limon fin, Lg : limon grossier, Sf : sable fin, Sg : sable grossier

Tableau 2. Valeur moyenne des paramètres hydro-physiques du sol

Profondeur (cm)	Humidité (%)		Da (g/cm^3)
	Hcc	Hpf	
0-10	29	43	1.5
10-20	30	45	1.5
20-30	29	45	1.5
30-40	29	46	1.5
40-50	29	46	1.5
50-60	28	44	1.5
60-70	27	44	1.5
70-80	27	43	1.5
80-90	27	43	1.5
90-100	27	44	1.5

Hcc : humidité du sol à la capacité au champ
Hpf : humidité du sol au point de flétrissement
Da : densité apparente du sol

3.2.2.3. Données liées aux cultures

Les données concernant les coefficients culturaux et les profondeurs racinaires maximales des différentes cultures sont issues de la bibliographie, notamment le Bulletin de la FAO n° 56 (Figure 7 et Figure 8).

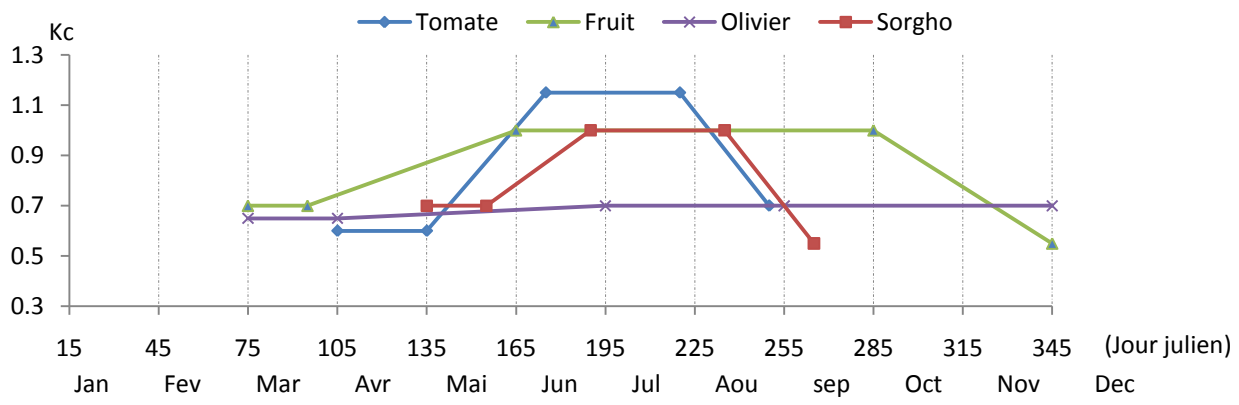


Figure 7. Les coefficients culturaux (Kc) des cultures installées

Source : (Allen et al., 1998)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

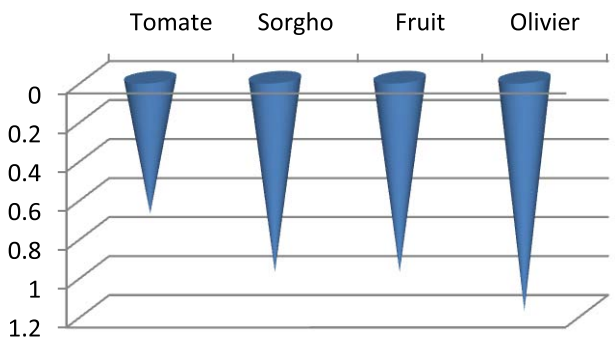


Figure 8. Profondeurs d'enracinement des cultures installées
Source : (Allen et al., 1998)

3.2.2.4. Etapes de calculs

Dans une première étape, une actualisation des besoins théoriques en eau d'irrigation des cultures installées durant le mois de pointe, qui est le mois de juillet, a été faite moyennant le modèle PILOTE sur une période de 23 ans. Afin de prendre en compte la variabilité climatique interannuelle, nous avons fait, par ailleurs, une analyse fréquentielle des résultats du modèle PILOTE en utilisant le programme SIGMAPLOT. Ceci a permis de dégager les besoins en eau d'irrigation des différentes cultures en année médiane et avec différentes probabilités au dépassement.

Dans une deuxième étape, le besoin brut en eau d'irrigation en année médiane, durant le mois de pointe, à l'échelle de la parcelle, a été estimé. Pour les cultures intercalaires avec l'olivier, le besoin en eau est supposé celui de la culture la plus consommatrice en eau (Allen et al.,1998). Le besoin brut à l'échelle de la parcelle correspond au besoin théorique net affecté par l'efficience de chaque technique d'irrigation. Dans cette étape, les efficiences utilisées sont celles calculés par Zairi et al. (2000) et Yacoubi et al. (2004); elles sont de 0.6, 0.7, 0.8 respectivement pour l'irrigation de surface, par aspersion et localisé. Les résultats de la typologie des exploitations ont été utilisés pour l'estimation du besoin brut à l'échelle du périmètre; le besoin a été calculé à l'échelle de l'exploitation type de chaque classe. Ayant l'effectif de chaque classe, le besoin a été estimé à l'échelle de la classe puis à l'échelle de l'ensemble du périmètre par agrégation du besoin de l'ensemble des classes.

3.3. Résultats

3.3.1. Occupation du sol et techniques d'irrigation utilisées

Les cultures pratiquées dans ce périmètre sont l'olivier, l'arboriculture fruitière, essentiellement le pêcher, les cultures maraîchères, essentiellement la tomate, le blé et le fourrage. Ces cultures sont pratiquées sur chacun des secteurs (Figure 9). Plus que 60% de la superficie du secteur de distribution gravitaire (G) est occupée par l'olivier contre 37% sur le secteur de distribution sous pression (P). En dehors du blé qui est cultivé sur 20% de la superficie du secteur P contre 4% sur le secteur G, le pourcentage de superficie du reste des cultures est à peu près le même sur les deux secteurs. Ces pourcentages sont donnés par rapport à la superficie assolée qui désigne la superficie en intercalaire avec l'olivier en plus de la superficie cultivée. Les cultures intercalaires occupent 15% de la superficie assolée.

Malgré la distinction entre les secteurs en termes de mode de distribution de l'eau (gravitaire ou sous pression), les trois techniques existent sur chacun des secteurs du périmètre (Figure 10). Sur le secteur G, 15% de la superficie assolée est conduite en irrigation sous pression, les agriculteurs se sont équipés pour la mise sous pression des systèmes d'eau en investissant dans la création de bassins et l'acquisition de groupes de pompage. Sur le secteur

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

P, 43% de la superficie assolée est irriguée par des systèmes de surface à cause de la faible pression disponible ou pour un propre choix justifié de l'agriculteur.

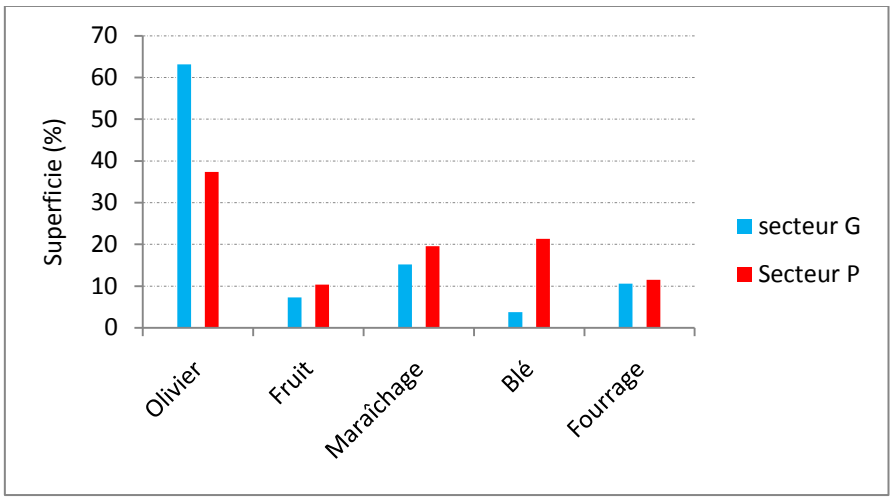


Figure 9. Ventilation des cultures pratiquées sur l'ensemble des exploitations familiales

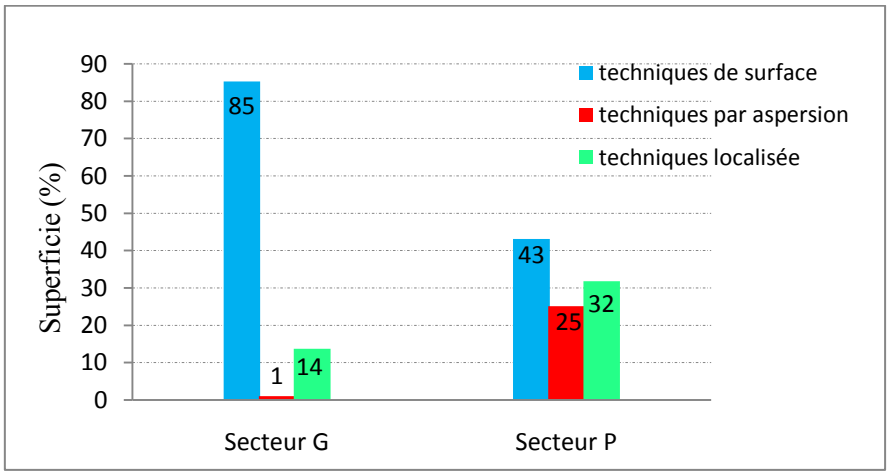


Figure 10. Ventilation des techniques d'irrigation sur les deux secteurs de distribution d'eau (G : distribution gravitaire, P : distribution sous pression)

3.3.2. Typologie des exploitations

3.3.2.1. Etude des variables sur le cercle des corrélations

La représentation graphique des variables de la typologie sur le cercle des corrélations (Figure 11) montre que les axes de tendance des variables A(%), Sgc/Sas et SAU(ha) sont situés sur la même direction et en même sens. La direction de ces trois variables est en opposition avec la direction de la variable Sarb/SAU. Donc, si la surface d'arboriculture est importante, la surface des grandes cultures est au contraire faible. De plus, les grandes cultures sont irriguées par aspersion et pratiquées sur des exploitations dont la surface agricole utile est relativement importante. Les axes des variables Smar/SAU, L(%) et Tauxintens sont sur la même direction et en même sens, ce qui indique que les cultures maraîchères sont à l'origine d'un taux d'intensification cultural important et qu'elles sont irriguées par la technique d'irrigation localisée. La technique d'irrigation de surface est la plus utilisée en arboriculture.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

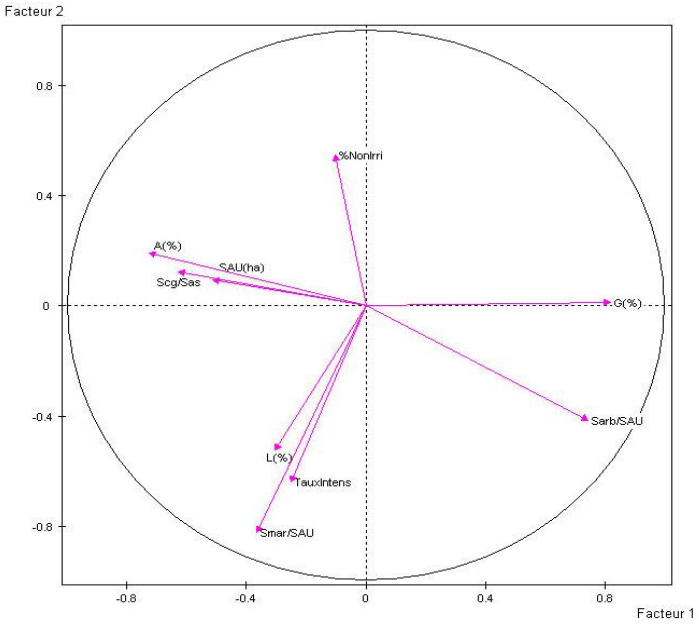


Figure 11. Cercle des corrélations de l'ACP sur le plan principal

3.3.2.2. Choix d'une classification des exploitations

Le logiciel SPAD a fourni un arbre de classification hiérarchique des exploitations. Pour choisir une coupure de cet arbre en classes, la progression de l'inertie inter-classes pour différentes coupures a été étudiée. Les valeurs de cette dernière avant et après itérations sont les mêmes à partir de la coupure de l'arbre hiérarchique en 6 classes (Annexe 1). Le Tableau 3 explicite les caractéristiques de l'exploitation type de chaque classe. Les classes 1 et 4 regroupent les exploitations sur lesquelles la technique d'irrigation de surface est la plus utilisée. La classe 1 diffère de la classe 4 par l'introduction de l'irrigation localisée avec un taux d'intensification cultural plus important. Dans la classe 2, les agriculteurs adoptent différentes cultures avec différentes techniques d'irrigation. La classe 3 regroupe les exploitations caractérisées par la plus importante superficie de culture maraichère et par un taux d'intensification cultural le plus élevé; 67% de la superficie assolée est en intercalaire avec les oliviers. Dans la classe 5, les agriculteurs adoptent surtout l'irrigation localisée et l'arboriculture fruitière. La classe 6 regroupe les exploitations qui adoptent le plus l'irrigation par aspersion et plus de superficie de céréale et de fourrage.

Tableau 3. Caractéristiques de l'exploitation type des classes d'agriculteurs.

Superficie agricole utile(S_u), superficie cultivée (S_c), Pourcentage de la superficie en intercalaire (S_{in} %), superficie de l'olivier (S_{oli}), de l'arboriculture fruitière (S_{or}), de cultures maraîchères (S_{cv}), de céréales (S_{cer}) et de fourrage d'été (S_{fc}), pourcentage de superficie irriguée par des techniques de surface (S_G %), en aspersion (S_S %), et au localisée (S_D **%).**

Classe	Su(ha)	Sc(ha)	S_{in} %	S_{oli}(ha)	S_{or}(ha)	S_{cv}(ha)	S_{cer}(ha)	S_{fc}(ha)	S_G (%)	S_S (%)	S_D (%)
1	6.89	6.44	16	4.52	0.75	0.50	0.82	0.98	90	2	8
2	6.79	6.05	19	2.93	0.61	2.08	0.95	0.81	48	16	36
3	5.25	5.06	67	4.00	0.00	3.94	0.00	0.63	63	3	34
4	6.22	3.71	3	3.40	0.08	0.10	0.17	0.13	100	0	0
5	6.62	5.19	2	1.81	1.88	1.44	0.06	0.16	12	3	85
6	7.64	6.47	13	1.77	0.42	1.12	2.87	1.27	24	55	21

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.3.3. Besoins nets en eau des cultures installées

Les besoins nets en eau d'irrigation en année médiane, durant le mois de juillet, résultant de l'analyse fréquentielle, sont résumés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Besoins net en eau d'irrigation durant le mois de juillet en année médiane.

Culture (technique d'irrigation)	Besoin net (mm)/juillet
Tomate (localisé)	190
Tomate (surface)	200
Olivier (surface)	180
Pêcher (localisé)	140
Pêcher (surface)	160
Sorgho (surface)	120
Sorgho (aspersion)	120

3.3.4. Capacité du réseau et besoin en eau d'irrigation du périmètre

Les résultats de la typologie des exploitations ont facilité l'estimation des besoins bruts en eau d'irrigation des cultures installées, à l'échelle du secteur de distribution d'eau et à l'échelle du périmètre en tenant compte des techniques d'irrigation réelles. Ce besoin était de 407 000 m3 sur le secteur de distribution gravitaire et de 630 000 m3 sur le secteur de distribution sous pression, soit un volume de 1 037 000 m3 à l'échelle du périmètre (Tableau 5).

Tableau 5. Besoin brut en eau d'irrigation durant juillet à l'échelle de chaque classe, secteur et l'ensemble des exploitations familiales.

G : secteur de distribution gravitaire, P : secteur de distribution sous pression

Classe	Secteur (effectif)	Besoin brut en eau d'irrigation (1000m3)/juillet
Class 1	G (15)	241
	P (7)	112
	Total (22)	353
Class 2	G (2)	26
	P (19)	250
	Total (21)	276
Class 3	G (4)	52
	P (0)	0
	Total (4)	52
Class 4	G (7)	77
	P (5)	55
	Total (12)	132
Class 5	G (1)	11
	P (7)	78
	Total (8)	89
Class 6	G (0)	0
	P (15)	134
	Total (15)	134
Secteur G	G (29)	407
Secteur P	P (53)	630
Périmètre	Total (82)	1037

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Avec un débit fictif continu (dfc) de 0.43 l/s.ha sur le secteur gravitaire et de 0.6 l/s sur le secteur sous pression, le réseau ne peut fournir qu'un maximum de 171 531 m3 sur le secteur gravitaire et 502 650 m3 sur le secteur sous pression. Ainsi, le réseau ne peut fournir que 42% des besoins des cultures installées sur le secteur gravitaire et 80% sur le secteur sous pression (Tableau 6).

Tableau 6. Confrontation de la capacité du réseau au besoin brut en eau d'irrigation à l'échelle des secteurs et à l'échelle de l'ensemble des exploitations familiales durant juillet

	Snette irriguable (ha)	dfc (l/s)	Offre maximal (m3)	Besoin brut (m3)	Offre/Besoin brut (%)
Secteur G	171	0.43	171 531	407 369	42
Secteur P	360	0.6	502 625	629 767	80
Total	531		674 156	1 037 136	65

3.4. Discussion

La conception des réseaux hydrauliques au sein des périmètres irrigués est généralement basée sur les prévisions d'assolement et les besoins correspondants en eau d'irrigation. Sur le périmètre de Borj Toumi-Tongar, comme le reste des périmètres irrigués de la basse vallée de la Medjerda, le besoin théorique par secteur de distribution a été calculé en se basant sur des hypothèses. Il était programmé d'irriguer la moitié ou le 1/3 de la superficie agricole utile. Pour cela, le réseau de distribution était conçu pour distribuer un débit fictif continu (dfc) de 0.43 l/s ha, sur le secteur de distribution gravitaire, pour l'arboriculture fruitière et les cultures maraichères par des techniques d'irrigation de surface. Sur le secteur de distribution sous pression, le dfc était de 0.6 l/s ha pour les cultures maraichères et les cultures fourragères en aspersion. La mise en regard de ces hypothèses avec la situation actuelle souligne des divergences. Les résultats de notre diagnostic ont montré qu'actuellement, durant le mois de juillet, toute la surface agricole utile est occupée. Cette orientation vers l'intensification des cultures et de l'irrigation ne concordant pas avec la capacité maximale de l'offre du réseau, le réseau n'a pu fournir que 65% des besoins en eau d'irrigation des cultures installées durant le mois de juillet.

D'une part, notre étude a montré que l'offre n'a pas été en mesure de satisfaire les besoins théoriques. D'autre part, des études ont montré que la disponibilité en eau des périmètres de la basse vallée de la Medjerda n'est utilisée qu'à raison de 30% (SCET-TUNISIE et HYDROPLAN, 2002). En fait, si un volume d'eau peut satisfaire les besoins durant l'année, il peut ne pas le faire durant le mois de pointe. En dehors de la saison estivale, le réseau ne fonctionne plus faute de coordinations entre agriculteurs et le groupement de développement agricole (GDA). En l'absence de problèmes de pompage, un nombre minimum d'agriculteurs doivent coordonner entre eux d'abord, et avec le GDA ensuite, pour pouvoir faire fonctionner la station de pompage. En plus, les problèmes de disfonctionnement du réseau dus au mauvais entretien de toute l'infrastructure hydraulique depuis la station de pompage jusqu'à l'exploitation, l'extension du nombre de vannes et d'exploitations hors périmètres, la durée de fonctionnement du réseau limité à 12 heures par jour et les problèmes d'endettement ne font que freiner la bonne gestion de cette disponibilité limitée en eau. Ces conditions sont aggravées par le mauvais aspect institutionnel de gestion de l'eau.

Les nouvelles conditions de fonctionnement du périmètre irrigué ont laissé les agriculteurs s'orienter vers l'adoption de l'olivier, relativement résistant au stress hydrique, sur une superficie de 47% de la superficie totale contre 18% de cultures maraichères d'été, 9% d'arboriculture fruitière et 11% de cultures fourragères. Quelques agriculteurs disposant de

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

fonds ont eu recours aux puits privés ou au pompage direct de la Medjerda ou ses affluents en année humide, s'ils y sont limitrophes.

3.5. Conclusion

Le diagnostic du périmètre a montré une dérive au niveau des superficies assolées, des cultures pratiquées et des techniques d'irrigations utilisées. Les enquêtes ont montré que, malgré la distinction entre les deux secteurs du périmètre en termes de mode de distribution de l'eau (gravitaire ou sous pression), les trois techniques d'irrigation coexistent sur chacun des secteurs, voire sur une seule exploitation. L'olivier est la culture la plus répandue en plus du développement de la culture de blé en sec, alors que la vocation était une culture maraichère, d'arboriculture fruitière et de fourrage. Ces choix culturaux ne respectent pas, en partie, les consignes inscrites dans les prévisions du projet initial élaboré pour le périmètre irrigué.

L'analyse des besoins en eau d'irrigation a montré que la capacité du réseau ne peut fournir que 65% des besoins à l'échelle de l'ensemble des exploitations agricoles. Les principes de conception du réseau n'ont pas bien apprécié les évolutions techniques, agronomiques et stratégiques et les contraintes qu'ils impliquaient. De plus, le mode de gestion des systèmes collectifs d'allocation de la ressource existante a conduit à une exacerbation des démarches individualistes pour accéder à l'eau avec une course aux pompages privés.

Deux constats majeurs servent de point de départ à notre réflexion dans la suite de notre travail : celui de l'extension de la superficie de l'olivier et du blé dans un périmètre irrigué destiné à produire du maraichage, des fruits et du fourrage, d'une part, et celui de l'influence de la qualité de l'offre en eau du réseau public sur la performance des exploitations agricoles, d'autre part.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 4 : Evaluation des indicateurs de performance hydraulique

Nous proposons dans ce chapitre les résultats de mesure et de calcul des indicateurs de performance hydraulique. Dans cette phase, nous avons choisi des échantillons d'exploitations de chaque classe d'agriculteurs pour mesurer les performances hydrauliques sur la lumière des résultats de la typologie du chapitre 3. La finalité de cette phase est d'identifier les indicateurs de performance hydraulique les plus pertinents. Les résultats serviront plus tard pour l'analyse de leur interaction avec les autres types d'indicateurs de performance.

4.1. Introduction

Le développement de l'agriculture passe obligatoirement par une meilleure gestion de l'eau dans les zones irriguées. L'évaluation de la performance des systèmes irrigués est donc d'une grande importance pour proposer des améliorations de la gestion à différentes échelles (Molden et Sakthivadivel, 1999).

En Tunisie, toutes les projections imposent une meilleure utilisation des ressources disponibles, ce qui relève du concept de l'efficience. La mesure des indicateurs de performance *in situ* et la présence d'une base de données détaillée sur les volumes d'eau utilisés est une condition préalable pour une évaluation précise de la performance de l'irrigation, chose difficile à obtenir sur la plupart des périmètres irrigués. Pour cela, l'analyse de la performance de l'irrigation est souvent effectuée en appliquant des modèles de bilan hydrique à l'échelle des périmètres irrigués, ce qui développe des indicateurs de performance basés sur des valeurs moyennes (Kloezen et Garcés-Restrepo 1998; Molden et al. 1998; Burt et Styles 1999). Il est aussi possible de générer une répartition optimale de l'eau d'irrigation pour chaque parcelle en utilisant des modèles de simulation (Heinemann et al. 2002) qui peuvent être utilisés comme référence à comparer avec la performance réelle (Lorite et al., 2004). Ces méthodes ne reflètent pas d'une façon précise les pratiques réelles d'irrigation du moment qu'elles ne peuvent pas évaluer le degré de variation de la gestion de l'irrigation d'un irrigant à l'autre.

Bien que l'évaluation de la variabilité de la performance de l'irrigation est primordiale pour estimer les potentiels réels d'amélioration de la gestion de l'eau, les études qui fournissent ces informations et ses conséquences manquent (Lorite et al., 2004). Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la mesure de différents indicateurs de performance hydraulique à l'échelle de la parcelle. Ces indicateurs serviront plus tard pour l'analyse de leurs interactions avec les indicateurs agronomiques et économiques.

4.2. Doses appliqués, efficiences et uniformité

L'évaluation de la dose appliquée par culture permet de calculer des indicateurs clés dans la performance des systèmes irrigués. Sa mesure fait souvent recours, lorsque cela est possible, à la modélisation. Dans le cas de l'irrigation par aspersion, il convient de disposer d'un modèle capable d'évaluer la répartition de l'eau au niveau de placettes élémentaires. Dans le cas de l'irrigation à la raie, de nombreux modèles existent, leur calage s'effectuant sur l'avancement, connaissant le débit d'entrée et le temps d'arrosage. La dose infiltrée estimée au moyen de ces modèles permet par intégration numérique d'évaluer les différents composants intervenant dans les équations de calcul de l'efficience d'application et du coefficient d'uniformité.

4.2.1. Doses appliquées

Dans ce travail, pour déterminer la dose infiltrée, nous avons procédé à la méthode gravimétrique en effectuant des prélèvements d'échantillons de sol avant et après irrigation.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

La mesure des humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent a permis de situer l'humidité à laquelle se déclenche l'irrigation par rapport à ces deux seuils.

Les résultats ont montré que, quelle que soit la technique d'irrigation utilisée, la dose appliquée, à différents stades du cycle de l'irrigation et sur toutes les cultures reste dans la zone racinaire. La dose brute par événement a été calculée en mesurant le débit à l'entrée de l'exploitation et la durée de l'irrigation. Les événements d'irrigation qui se déroulent sur deux ou trois jours successifs pour la même parcelle comptent pour un seul événement. Connaissant le nombre d'irrigations durant le cycle grâce aux enquêtes, il a été possible de calculer la hauteur d'eau brute appliquée pour chaque parcelle par événement et par cycle d'irrigation.

4.2.2. Efficience et uniformité de distribution

Les indicateurs mesurés sont l'efficience de distribution à la parcelle qui défini le rapport entre ce qui est délivrée à l'exploitation comme volume facturé et le volume utilisé en irrigation d'une parcelle, l'efficience d'application qui exprime le rapport entre la dose stockée dans la zone racinaire et celle appliquée, et l'uniformité de distribution de l'eau qui exprime le rapport entre le moindre quartile et la dose moyenne. Ces indicateurs ont concerné différentes parcelles irriguées par différentes techniques et à différents stade du cycle d'irrigation.

4.2.2.1. Cas de l'irrigation de surface

Les mesures de débit ont été effectuées à l'aide d'un seuil Parshall (Figure 13) à l'entrée des exploitations et à l'entrée des parcelles. Ces mesures ont montré que les efficiences de distribution de l'eau à la parcelle varient entre 36%, dans le cas d'une parcelle loin du point d'eau (plus de 100m) et utilisant un débit faible (5l/s), et 100%, dans le cas des parcelles situées à l'entrée de l'exploitation et juste au niveau du point d'eau, avec une valeur médiane de 80% (

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tableau 7). On a remarqué que, pour des parcelles loin du point d'eau, en utilisant un débit optimum, l'efficience de distribution vers la parcelle peut atteindre 95%. Ce débit, lorsqu'il est disponible, ne provoque pas d'érosion et ne favorise pas l'infiltration dans les arroseurs en terre surtout après plusieurs irrigations.

Les profils des humidités des échantillons prélevés ont permis de calculer l'uniformité de distribution. Elle varie de 63%, en irrigation par planche de grande dimension utilisant un faible débit (5l/s), à 90% en irrigation par planche de faible largeur (2m) et en irrigation des oliviers par cuvette. Quelques irrigants ont montré un savoir-faire de distribution de l'eau dans les planches de submersion, ce qui s'est traduit par une bonne distribution de l'eau (Figure 14, Figure 15).

4.2.2.2. Cas de l'irrigation par aspersion

Les débits en tête des exploitations ont été mesurés en utilisant les indications des compteurs au début et à la fin de l'essai. Des essais de distribution d'asperseurs en plein champ ont été effectués. Le programme CATCH3D a permis de calculer le coefficient d'uniformité de Christiansen, l'uniformité de distribution et la pluviométrie des asperseurs.

Les résultats de mesures ont montré que l'efficience de distribution vers la parcelle peut être bonne (88%) sur les exploitations ayant un matériel en bon état et peut être médiocre (22%) lorsque le matériel est vétuste, situation qui est fréquente. Le coefficient d'uniformité de Christiansen varie de 58 à 96% (Tableau 8).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tableau 7. Résultats de mesures de doses brutes (DB), de l'efficience de distribution vers la parcelle (Ed) et de l'uniformité de distribution (UD) en irrigation de surface

Culture/système	exploitation	DB(m3/ha)	Ed	UD
Olivier par cuvette	1	258	68	87
	2	213	65	-
	3	572	72	72
	4	153	100	85
	5	490	90	88
	6	123	79	68
Fruit à la raie	7	579	100	79
	8	423	100	65
	9	152	88	
Fourrage par submersion	10	875	82	-
	11	692	63	91
	12	569	95	-
	13	392	36	63

Tableau 8. Résultats de mesures du coefficient d'uniformité des débits (Cu), coefficient d'uniformité de Christiansen (Cu Christiansen), l'uniformité de distribution (UD) et de l'efficience de distribution vers la parcelle (Ed) en irrigation par aspersion

exploitation	culture	Cu (%) des débits des asperseurs	Cu (%) de Christiansen	UD (%)	Ed (%)
1	luzerne	83	58	42	54
2	blé	95	-	-	-
3	orge	63	-	-	-
4	orge	92	96	91	-
5	blé	77	-	-	-
6	orge	66	-	-	
7	sorgho	73	82	67	50
8	luzerne	90	89	88	88

4.2.2.3. Cas de l'irrigation localisée

Comme en irrigation par aspersion, les débits en tête des exploitations ont été mesurés en utilisant les indications des compteurs au début et à la fin de l'essai. Le coefficient d'uniformité a été mesuré par le coefficient de Merriam et Keller (1978).

Une mauvaise conduite de l'irrigation localisée a été constatée. La vétusté du matériel, l'inadaptation de la station de filtration au débit utilisé et le colmatage des distributeurs affectent fortement l'efficience de distribution vers la parcelle et le coefficient d'uniformité des goutteurs. Les résultats de mesures ont montré que le coefficient d'uniformité des goutteurs varie de 20% à 86%, avec une valeur médiane de 61%, et l'efficience de distribution vers la parcelle de 54 à 83% (Tableau 9). Des prélèvements de sol avant et après irrigation ont montré que les apports d'eau sont massifs à chaque application pouvant atteindre 36 mm en

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

des points relativement loin des goutteurs avec une fréquence des irrigations de 1 jour sur 2 (Figure 12).

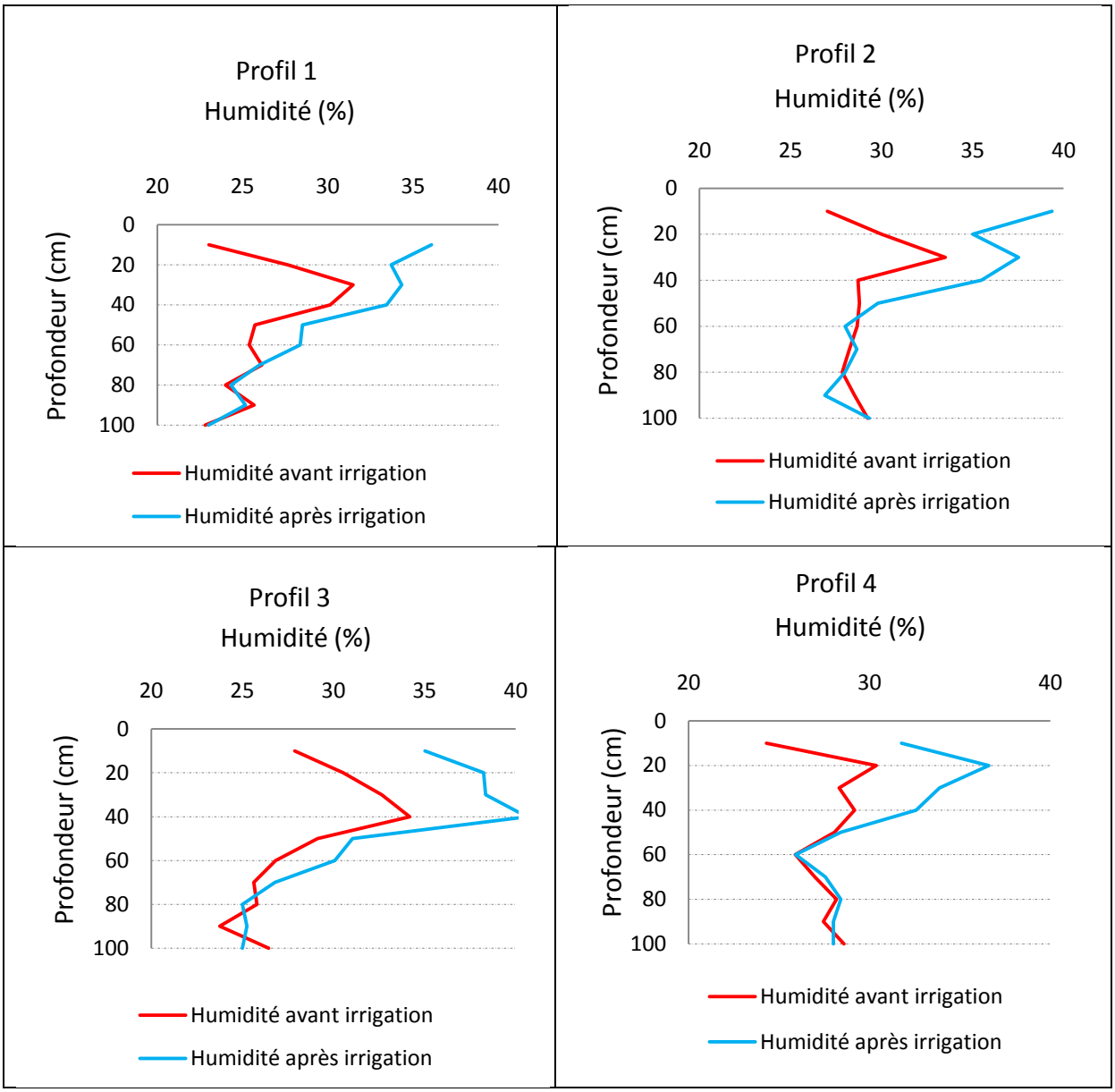


Figure 12. Profils d'humidité avant et après irrigation (tomate en goutte à goutte)

Tableau 9. Résultats de mesures du coefficient d'uniformité (Cu) et de l'efficience de distribution vers la parcelle (Ed) en irrigation localisée

culture	Cu(%)	Ed (%)
tomate	73	54
tomate	61	56
tomate	83	72
tomate	86	83
tomate	56	56
tomate	59	
piment	71	
pommier	32	
poirier	72	
pêcher	20	

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Avec les trois techniques d'irrigation, les doses appliquées durant les irrigations suivies par les prélèvements de sol, à différents points de chaque parcelle, restent dans la zone racinaire ; Les efficiences d'application des irrigations suivies peuvent être considérées de 100%.

4.4. Discussion

La particularité du contexte étudié, liée au caractère argilo-limoneux du sol, a mis en évidence que l'efficience de distribution de l'eau vers la parcelle de l'irrigation de surface peut atteindre 80 à 90%. Contrairement à ce qui est connu sur les techniques de surface, cette valeur de l'efficience est généralement considérée comme excellente. De même que pour l'indicateur de l'uniformité de distribution, nos résultats de mesure ont montré qu'en irrigation de surface, l'uniformité de distribution peut atteindre 90% bien que cette technique d'irrigation soit connue pour sa forte variabilité de distribution de l'eau (Ruelle et all, 2005). En fait, en cas de disponibilité de l'eau en débit, plusieurs agriculteurs ont montré un savoir-faire dans la distribution de l'eau dans les bassins, surtout de petites dimensions, de l'ordre de (12x3) m, ou dans les cuvettes, en introduisant l'eau en deux temps. Ce savoir-faire en irrigation de surface devient insuffisant sur de grandes superficies, nécessitant une main d'œuvre extérieure et dont la productivité est bien inférieure à celle de la main d'œuvre familiale. Les mesures ont montré que les systèmes d'irrigation de surface peuvent même atteindre des efficiences supérieures à celles des systèmes d'aspersion et localisé. En plus, et en dehors de la culture de tomate, cette technique, jugée performante d'un point de vue agronomique, est privilégiée par les agriculteurs car elle garantit un stock important leur permettant de surmonter les problèmes de coupure de l'eau du réseau.

Malgré les subventions accordées par l'état pour l'acquisition de matériel d'irrigation économe en eau, les agriculteurs trouvent différentes difficultés pour bénéficier de ces subventions. L'endettement conjugué au coût élevé du matériel d'irrigation a été un facteur limitant pour les petits agriculteurs aux moyens limités. C'est pour cela que l'efficience de distribution vers la parcelle des réseaux d'irrigation par aspersion et au localisé est médiocre sur la plupart des parcelles suivies. La quasi-totalité des conduites et des asperseurs qu'utilisent les agriculteurs sont anciens (Figure 16, Figure 17). De même, en irrigation localisée, où les conduites de transport sont les mêmes que celles utilisées en aspersion, le réseau d'irrigation est acheté en deuxième main. Le mauvais état du réseau d'irrigation conjugué à son inadaptation à la station de filtration et l'absence totale d'entretien a conduit à de faibles efficiences hydrauliques des systèmes localisés. En raison de leur manque de formation, certains agriculteurs enlèvent carrément les goutteurs qui ne débitent plus s'il s'agit de goutteurs en dérivation ou réalisent des trous dans les rampes s'il s'agit de gaines ou de goutteurs intégrés. Mailhol et al.(2004) ont contrôlé la distribution de l'eau sur des parcelles de tomates irriguées en goutte à goutte dans un périmètre de la Basse vallée de la Medjerda en Tunisie et ont prouvé qu'il existe une grande variabilité de la maîtrise de technique de l'irrigation en goutte à goutte, allant jusqu'à annuler toute économie d'eau. Nos mesures ont confirmé leurs résultats quant à l'écart entre les débits nominaux et les débits mesurés (tableau 3) et ont montré que les uniformités mesurées par le coefficient de Merriam et Keller (1978) restent dans des valeurs médiocres pour de tels systèmes. En plus de la mauvaise uniformité des distributeurs, les agriculteurs font des apports massifs pouvant atteindre des doses de 30 mm. L'adoption de l'irrigation localisée est considérée comme solution au problème de la main d'œuvre plutôt qu'une technique d'économie d'eau ou d'amélioration de la qualité des produits.

4.5. Conclusion

Ce travail, basé sur des mesures *in situ,* a montré que, contrairement à ce qui est reconnu, les performances de l'irrigation de surface peuvent être meilleures que celles utilisant les techniques sous pression dans des conditions bien déterminées de nature du sol et de savoir-faire de l'irrigant. L'irrigation de surface n'est pas forcément inefficiente et elle peut assurer une bonne efficience hydraulique et une bonne distribution de l'eau, améliorant ainsi

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

l'efficience de l'utilisation de l'eau. L'inconvénient majeur de l'irrigation de surface, qui est la main d'œuvre, ne pèse pas beaucoup, surtout en irrigation d'olivier et de fourrage, car les exploitations du périmètre sont familiales, de taille relativement petite (de l'ordre de 7 ha), où la main d'œuvre familiale est très productive.

L'efficience d'application a été élevée dans la majorité des cas de mesures. En irrigation sous pression, les apports d'eau se font à faibles doses; hormis les pertes par embruns, nous n'avons pas enregistré de pertes par percolation profonde. En irrigation de surface, le mode d'apport d'eau s'apparente beaucoup plus à une technique d'irrigation par bassin que par planche malgré l'existence de la pente. En effet, le temps d'avancement de l'eau est très court compte tenu des faibles longueurs des éléments irrigués.

Par contre, nous avons enregistré des pertes en eau substantielles au niveau du réseau de distribution vers la parcelle. Ces pertes atteignent dans certaines exploitations 50 % du volume total prélevé par l'agriculteur en irrigation sous pression, et 37%% en irrigation de surface. En réseau sous pression, ces pertes importantes sont dues à la vétusté des conduites de transport de l'eau. Les efficiences de distribution vers la parcelle et les uniformités de distribution ont été caractérisées par une large variabilité entre les exploitations. Cette variabilité indique qu'il existe un potentiel important pour des améliorations, même si la performance moyenne reste raisonnable.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure 13. Mesure de débit à l'entrée de la parcelle par un seuil Parshall

Figure 14. Pratiques de répartition de l'eau dans les planches de submersion

Figure 15. Pratiques de répartition de l'eau en irrigation de poirier par double raie

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure 16. Pertes d'eau dans les conduites de distribution vers la parcelle sur un réseau par aspersion

Figure 17. Pertes d'eau sur les portes rampes d'un réseau en goutte à goutte

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 5 : Analyse de la performance des systèmes irrigués dans une approche globale à l'échelle de la parcelle

Ce chapitre propose une évaluation de l'efficience économique et d'utilisation de l'eau à l'échelle de la parcelle et une analyse de ces efficiences en fonction des indicateurs de performance hydrauliques et agronomiques ainsi que l'interaction entre eux. Il a fait l'objet d'un article rédigé en anglais soumis pour publication à la revue Agriculture Water management: Hanafi, S., Zairi, A., Ruelle, P., Mailhol, J.C., Le Grusse, P. A holistic approach for analyzing irrigation systems' performance: a case study in a public irrigation scheme in northern Tunisia. L'article est présenté en anglais complété par un résumé et une conclusion en français.

La performance hydraulique des systèmes irrigués est exprimée en termes d'efficience basée sur les quantités d'eau mesurées à différents points du système de distribution de l'eau. Le rapport des quantités en amont et en aval définit l'efficience d'une partie bien déterminée du système. L'objectif principal de l'engineering en irrigation était toujours d'augmenter ces efficiences (Akbari et al., 2007)

Résumé

De nombreux systèmes de production agricole en irrigué sont caractérisé par une faible performance hydraulique. Ces systèmes mettent en jeu des processus complexes et interactifs. Il est donc important d'analyser la performance en tenant compte, à la fois, de ces différents processus. Une analyse multidisciplinaire s'avère donc nécessaire. Cette étude a tenté d'analyser la performance des systèmes irrigués avec une approche globale, en tenant compte des différents facteurs intervenant dans le processus de production dans le contexte d'un périmètre irrigué situé dans le nord de la Tunisie. Des mesures hydrauliques *in situ* en plus des informations agronomiques et économiques collectés à travers des enquêtes détaillées ont été mises en œuvre pour calculer les scores d'efficience économique et d'utilisation de l'eau pour chacune des parcelles moyennant une analyse par enveloppement des données (DEA). Ces scores ont été soumis à une analyse statistique de leur variance en relation avec des indicateurs choisis. Les résultats ont montré que l'efficience technique, qui évalue le degré d'efficience avec lequel sont utilisés les inputs, a été de 0.85 pour l'arboriculture fruitière, la tomate et le blé et de 0.66 pour l'olivier. Par contre le score d'efficience d'utilisation de l'eau a été faible en moyenne. Il était de 0.35 pour l'olivier et le blé et de 0.65 pour la tomate et les fruits. L'efficience de distribution de l'eau vers la parcelle a été faible et peut chuter à 36%. Un important potentiel existe donc pour une amélioration de la gestion de l'eau. Nous avons montré que l'accès à l'eau est le levier le plus important pour une meilleure performance. Aussi, la performance hydraulique n'avait pas d'impact significatif sur la performance économique qui est le premier souci de l'agriculteur. Deux solutions ont été proposées pour résoudre ce problème de divergence entre le souci de l'agriculteur purement économique et l'objectif de la communauté de gérer au mieux la ressource en eau. La première se réfère à une sérieuse attention pour appliquer le programme national de subvention pour l'acquisition d'équipement d'économie en eau. La deuxième se propose d'augmenter le cout de l'eau de l'irrigation afin de le considérer comme les autres facteurs de production couteux.

Mot clés: Levier de performance, approche holistique, efficience économique, efficience hydraulique, système irrigué, Analyse par enveloppement des données (DEA)

Abstract

On many agricultural production systems, including irrigation, hydraulic performance performs poorly. As irrigation systems entail complex and interacting processes, it is important to measure the performance indicators, according to various processes. A split up of

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

domain is so necessary. This study attempted to analyze irrigation systems performance with a holistic approach including different factors of the production process in the context of an irrigation scheme in northern Tunisia. On farm hydraulic measurements with agronomic and economic information collected through detailed surveys was implemented to calculate both the economic and the irrigation water use efficiency scores, on every individual plot, using the Data Envelopment Analysis. These scores were subjected to a statistical analysis of their variance in relation to some indicators. Results showed that the technical efficiency, that evaluates the degree to which the inputs are used efficiently, was about 0.85 for fruit orchards, tomato and wheat and 0.66 for olive trees. At the opposite, the irrigation water use efficiency was low. It was only of 0.35 for olive trees and wheat and about 0.65 for fruit orchards and tomato. The on-farm distribution efficiency was poor and can decrease to 36%. So, a great potential for improving water management exist. We pointed out that the access to water is the most pertinent lever for a better performance. On the other hand, the hydraulic performance has no significant impact on the economic performance, the main concern of the farmer. Two solutions were proposed to solve this problem of divergence between the farmer's concern and those of the community, the water savings. The first one refers to a serious attention regarding the application of the subsidies national plan for granting new water saving equipment. The second one is the increase of irrigation water costs in order to consider water as a significant production factor.

Keywords: Performance lever, holistic approach, hydraulic efficiency, economic efficiency, irrigated systems, data envelopment analysis (DEA)

5.1. INTRODUCTION

Performance evaluation of irrigated areas is an activity that is necessary for improving the performance at various scales (Molden et Sakthivadivel, 1999). Hydraulic indicators usually focuses on a set of key performance indicators related to application efficiency, On-farm distribution efficiency and uniformity of water distribution (Pereira et al., 1999; Horst et al., 2005; Juana et al., 2007; Pereira et al., 2007), and sometimes extended to equity, flexibility, sustainability and productivity (Lorite et al., 2004; Gorantiwar et Smout, 2005; Vandersypen, 2006). Even, more precise water use concepts and performance descriptors were proposed in order to distinguish between water which can be reused and actual water lost from a defined system by introducing the concepts of beneficial and non-beneficial water uses (Pereira et al., 2011). But several studies showed that hydraulic performance at tertiary level remains unsatisfactory (Ouvry et Marlet, 1999). The economists use the concept of efficiency to account the criterion of maximal outputs and the possibility of a minimal use of inputs. The agronomists have focused on the analysis of the sol-plant-atmosphere relationship and water productivity (WP), especially the agriculture sector faces the challenge of producing more with less water. Zairi et al. (1999) studied the response of the yield to different surface irrigation strategies. Even several studies have focused on agronomic indicators based on the water use efficiency (WUE) or water productivity (WP) to which transferred the attention given to irrigation efficiency (Pereira et al., 2011). Although these efforts, many agricultural production systems, including irrigated agriculture, perform poorly (Hamdi et al, 2003). Consequently, it is necessary to seek the cause of the low performance of the agricultural irrigated systems.

Irrigation systems entail complex and interacting processes such as physical, social, economic, political, technical and environmental ones. So, it seems relevant to evaluate the performance indicators, according to these various processes. A split-up of domains is needed because a universal or single menu cannot be applicable due to the diversity of issues and challenges (Zoebl, 2006). For instance, the approach of benchmarking in the irrigation sector states that irrigation involves different processes in interaction with the overall objective which is to improve performance (Malano, 2004). Benchmarking thus identifies critical

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

success factors of an organization to achieve its objective (Goodstein et al., 1993). It is based on comparative indicators establishing whether an irrigation system is more or less efficient than another and evaluating the gap between current and achievable performances (Burt et Styles , 2004).

In Tunisia, the irrigated schemes of the Medjerda constitute a strategic pivot of irrigated agriculture. These schemes play an important role in socio-economic development. Studies on the performance of irrigation systems of these schemes were conducted by specialists who dealt with specific subjects without considering the irrigation systems in a holistic approach (Zairi et al. 1998; Zairi et al. 2003; Mailhol et al., 2004; Yacoubi et al., 2010; Slatni et al., 2011). When analyzing the cause of variability of performance, these specific studies may consider the effect of one factor without taking into account the effect of another. Moreover, the interaction of different factors amplifies the expected effect of a given constraint. Pereira et al.(2002) identified the need to develop appropriate methodologies to analyze social, economic and environmental benefits of improved irrigation management. Ghazouani et al. (2009) have studied the farmers' discourse, practices and perceptions in the modernization program for a better management of an oasis in southern Tunisia. Le Grusse et all. (2009) have proposed an approach to simultaneously take into account the technical, agricultural, economic and environmental objectives at the farm level.

The present study aimed to analyze the irrigation systems' performance with a holistic approach including different factors of the production process in the context of an irrigation scheme bordered to the Medjerda River, located in the north of Tunisia. The aim is to depict actual and pertinent factors for the global performance of irrigated systems in view of proposing levers for better management of the irrigated system. We will focus on the actual individual practices with respect to different classes dressed by the farms typology in a previous study (Hanafi et al, 2011). The results of this research will be useful in the perspective of the rehabilitation and modernization projects of irrigation schemes to which belongs this area of study.

5.2. Materials and methods

5.2.1. Case study and data survey

The study area is one of the Medjerda irrigation schemes, northern Tunisia (36°45' N, 9°45'S). Created in 1966, it surfaces 785 ha with 425 ha subject to a gravity distribution system within witch farmers communicate their water demand to a water bailiff who opens the intake of the tertiary canal accordingly. An under pressure distribution system serves farms on-demand but secondary canals are not permanently filled. Some farms are subject to constraints of the difficult access to water. The difficult access to water can be due to the quality of water supply dictated in parts by the service of water users' association or to the low pressure, on the under pressure sector, dictated by the network conception or the extension of number of water gates. The easy access to water can be due to the geographical location or to the possibility of the access to other water resources by pumping in wells or in the Medjerda River or by constructing basins for stocking water in the case of investment availability.

For this study, a farm survey was carried out in 2008 to obtain economic results on the crop year 2007/2008, which was a dry year, and concerned 68 plots of 26 farms. The selection of farms sample was based on the typology already done by Hanafi et al, (2011) on all farms of the irrigation scheme in order to reflect the diversity related to irrigation systems and the adopted crops. Some cooperative farmers of each class were subjects of the survey. The survey focused on all production costs, yields and selling prices of all field products. The yield concerned tree years for olive trees. These costs were for agricultural machinery, seed, labor, fertilizer, phytosanitary treatment and irrigation water charges. As farms communicate their water demand to a water bailiff on the gravity sector, it was possible to collect the

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

journal Water-use records. But, on the under pressure sector Water-use records were monthly. For farms that use private pumping from the auxiliary water sources, electricity bills and fuel costs are retrieved. Meanwhile, schedules irrigation for each of them, were reconstructed for each crop. Using hydraulic measurements made *in situ*, it was possible to estimate the volume of water consumed at each plot.

5.2.2. Hydraulic indicators

The analysis of irrigation performance is often done by applying water-balance models to irrigation schemes that develop performance indicators based on average values for the whole irrigation area (Kloezen et Garcé-Restrepo, 1998; Molden et al., 1998; Burt et Styles, 1999). However, this procedure may not reflect accurately the actual irrigation practices in the area, since it does not capture the degree of variation in irrigation management among farmers. In this study, the on field measurements and information provided calculation of a set of irrigation indicators at the plot scale irrigated with the three irrigation techniques. Calculated indicators are the On-farm distribution efficiency (DE), the application efficiency (AE) proposed by Allen et al. (1997), the coefficient of uniformity (CU) proposed by Merriam et Keller (1978) and the distribution uniformity (DU) which is also commonly used as indicator of the uniformity of water application to a field as defined by (Heermann et al., 1990).

5.2.3. Analysis of techno-economic data

The results of the survey were firstly processed; all the inputs and outputs are converted into monetary values. In this study, techno-economic data were processed with EXCEL to produce conventional indicators at plot scale. These indicators were variable costs, gross margins and yields. The comprehension of the relationship between factors operating in the production process has begun by analyzing the relation between the gross margin-economic indicator- and both, the On-farm distribution efficiency -hydraulic indicator- and the yield-agronomic indicator-.

The analyses of the partial productivity of production factors take into account the contribution of one factor in production. However, this analysis does not take into account interactions between factors of production. The efficiency analysis could overcome this limitation and provide improvement possibilities for better efficiency using the same resources. Farrel (1957) proposed that the efficiency of a firm consists of two components, the technical efficiency, which reflects the ability of a firm to increase output from a given set of inputs, and allocative efficiency, which reflects the ability of a firm to use the inputs in optimal proportions, given their respective prices. These two measures are combined to provide a measure of the economic efficiency. Several mathematical techniques have been developed to measure the efficiency of productive processes. These techniques are called efficient-frontier techniques and comprise non-parametric techniques such as data envelopment analysis (DEA) and parametric techniques such as corrected ordinary least squares (COLS) and stochastic frontier analysis (SFA) (Bojanic et al., 1998; Jamasb et Pollitt, 2000; Sinuary-Stern et al., 2000; Tongzon, 2001; Thanassoulis, 2000). The results from both methods are highly correlated in most cases (Alene et Zeller, 2005; Thiam et al., 2001; Wadud et White, 2000), indicating that both methods are valuable and the choice can be based on a researcher's preference. Among these techniques, DEA has a number of advantages. Firstly, it has the ability to analyze inputs and outputs simultaneously and to derive an efficiency rating within a set of analyzed units. Secondly, DEA does not require the development of standards against which efficiency is measured. Thirdly, it does not require predetermined production functions to relate inputs and outputs. These features make DEA especially useful for analyzing performance in an irrigation scheme. The model is described in Figure 18.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

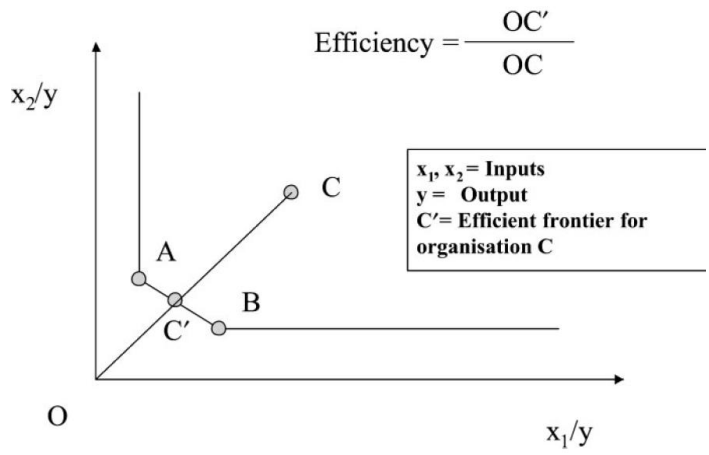


Figure 18. Data envelopment analysis (from Rodriguez-Diaz et al., 2004)

The figure shows two similar organizations (A, B) which have similar processes using two inputs (x1, x2) for a given output y. Organizations A and B produce the given output with less input and ‘‘envelop’’ the less efficient organization C. The measurement of technical efficiency of organization C is based upon deviations of its observed output or input vectors from the efficient production frontier defining so its level of efficiency. The DEA uses piecewise linear programming to calculate the efficient frontier of a sample of organizations. The measure of technical efficiency indicates how a producer can minimize all inputs in his production process without changing the output level (input oriented). Even, the technical efficiency can indicates how a producer can maximize the outputs keeping the same level of inputs (output oriented). Also, it is possible to consider the reduction of one or plus of the inputs while keeping other inputs and the output constant. This can be applied to the possible reduction in irrigation water volumes. Frija et al., (2009) considered the possible reduction of a subset of inputs while keeping other inputs and the output constant. Applied to the possible reduction in irrigation water use, the efficiency measure produced called it “irrigation water use efficiency” (IWUE).

There are two DEA model, the first (Charnes et al., 1978) assumes a constant returns to scale (CRS); an increase in the quantity of inputs consumed will lead to a proportional increase in the amount of output produced. However, in practice this may not always be observed, as increasing the input does not usually result in a proportionate increase in output (Speelman et al., 2008). The second DEA model was assessed by (Banker et al., 1984) who suppose a variable returns to scale (VRS). This option might be more suitable for technical efficiency measures in the case of irrigated farms (Rodriguez Diaz et al., 2004) as increasing the amount of irrigation water, for example, does not results a proportional increase in yield. One can conduct both a CRS and a VRS model upon the same data, if there is a difference between the two technical efficiency scores indicating that the firm operates on a VRS area and the ratio of these two scores represents the scale inefficiency (Coelli et al., 2002).

In this study, efficiency scores were calculated using the DEAP program considering the VRS assumption. We were limited to the concept of technical efficiency as in economic literature we generally refer to the later when dealing with economic efficiency (Bravo-Ureta et al., 1993). In a first step technical efficiencies was calculated by executing the DEAP program using the single output which was the value of the production evaluated in monetary units- Tunisian dinar (DT)- and two inputs which were the land (ha) and variable costs including irrigation water costs. The output orientation was chosen as we want to maximize the output using the same inputs. In a second step a “sub vector efficiency” measure, output oriented, was generated by considering the possible increase of outputs with a better irrigation water management while keeping inputs constant. The efficiency measure produced can be called “irrigation water use efficiency (IWUE). The efficiency scores resulting from each step were subjected to statistical analysis in relation to some variables and their interaction in order to

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

depict pertinent variables for efficiency scores using the analysis of variance explained in section 2.5.

5.2.4. DEAP Program

The Deap program (Coelli, 1996) has been written to perform data envelopment analyses (DEA) and to calculate efficiency scores in a production system. One of the tree principal options of this program involves the standard constant returs to scale (CRS) and the variable returns to scale (VRS) DEA models which involve the calculation of the technical and the scale efficiencies.

5.2.4.1. The Constant Returns to Scale Model (CRS)

The purpose of DEA is to build a non-parametric envelopment frontier over K inputs and M outputs on each of N firms. For *the i-th* firm these inputs and outputs are represented by the vectors xi and yi, respectively. The KxN input matrix, X, and the MxN output matrix, Y, represent the data of N firms. The envelopment frontier over the data points is such that all observed points lie on or below the production frontier. The DEA is introduced via the ratio form; for each firm, a measure of the ratio of all outputs over all inputs, such as uy_i/vx_i, would be calculated.

u: $M\times 1$ *vector of output weights*

v: $K\times 1$ *vector of input weights*

To select optimal weights, the following mathematical programming problem is specified:

$Max_{u,v}\ (uy/vx)$, *(finding values for u and v maximizing efficiency measure)*

st $uy_j/vx_j \leq 1, j=1,2, \ldots, N,$ *(subject to efficiency measure must be ≤ 1)*

$u,v \geq 0$

This particular ratio formulation has an infinite number of solutions. To avoid this it could be supposed the constraint $vx_i=1$, even u and v could be transformed to μ and v. The obtained form is known as the *multiplier* form of the linear programming problem:

$Max_{\mu, v}\ (\mu\, y_i)$,

st $vx_i=1$

$\mu\, y_j - v\, x_j \leq 1, j=1,2, \ldots, N,$

$\mu, v \geq 0$

Using the duality in linear programming, one can derive an equivalent envelopment form of this problem:

$Min_{\theta,\lambda}\ \theta$, *(θ is a scalar and λ is a N×1 vector of constants)*

St $-y_i + Y\lambda \geq 0,$

$\theta x_i - X\lambda \geq 0,$

$\lambda \geq 0,$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

The value of θ obtained from this envelopment form, which involves fewer constraints than the multiplier form, is the efficiency score for *the i-th* firm and satisfies $\theta \leq 1$. A value of 1 indicates a point on the frontier so a technically efficient firm, according to the Farrel (1957) definition.

The piecewise linear form of the non-parametric frontier in DEA can cause a few difficulties in efficiency measurement. The problem arises because of the sections of piecewise linear frontier which can run parallel to the axes which do not occur in most parametric functions. This problem is known as *slack* or *input excess* in the literature. Koopman's (1951) definition of technical efficiency was stricter than the Farrel (1957) definition and considers that a technically efficient firm operates on the frontier and furthermore all associated slacks are zero. More information on how to reformulate the linear programming problem to overcome these difficulties by calculating slacks is presented in (Coelli, 1996).

The CRS assumption is only appropriate when all the firms are operating at an optimal scale. Imperfect competition, constraints on finance, etc. may cause a firm to be not operating at optimal scale. Banker, et al. (1984) suggested the VRS DEA model to account for variable returns to scale (VRS) situations. The use of CRS specification results in measures of technical efficiencies (TE) which are confounded by *scale efficiencies* (SE). The use of the VRS specification allows the calculation of TE devoid of these SE effects. The CRS linear programming problem can be easily modified to account for VRS by adding the convexity constraint. This provides TE scores which are greater than or equal to those obtained by CRS model.

5.2.4.3. Input and output orientation

Farrell's input-based measures the technical inefficiency as a proportional reduction in input usage. It is also possible to measure technical inefficiency as a proportional increase in output production. This possibility is with a great importance because in some firms it can be asked to produce as much as output possible using a fixed quantity of resources. The orientation chose depend on which quantities the managers have most control over. Under CRS assumption, the two measures are the same however when VRS is assumed they are unequal.

5.2.5. Statistics

Different comparisons test two or more different groups for a significant difference in the mean or median values. Depending on the number of groups to compare and the distribution of the sample data, the appropriate comparison test is selected; when comparing two groups, if samples were taken from normally distributed population and the variances of the two populations are equal, the parametric unpaired t-test, which directly compares the sample data, can be used. If not, the Mann-Whitney rank sum test can be used. This test arranges the data into sets of rankings, then performs an unpaired t-test on the sum of these ranks, rather than directly on the data. When comparing many groups, if samples were taken from normally distributed population and the variances of the two populations are equal, the single factor or One Way ANOVA, the Two Way ANOVA, the Three Way ANOVA can be used, and they directly compare the samples arithmetically. If not, the Kruskal-Wallis ANOVA on ranks can be used. The one way ANOVA of two groups obtains exactly the same P value as an unpaired t-test or the Mann-Whitney on ranks test. The null hypothesis is that there is no difference among the populations from which the samples were drawn.

In this study, at a first step, a one way ANOVA was performed to calculate the mean or the median of the technical efficiency scores in relation to groups of the distribution sector, the irrigation technique, classes of On-farm distribution efficiency, access to water, classes of applied net water depth, mechanization and classes of yield. Same for the irrigation water use efficiency scores in relation to the distribution sector, the irrigation technique, the On-farm

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

distribution efficiencyand the access to water. The quantitative factors were transformed into classes which were aggregated when differences observed between the means or the medians are not significant. In a second step, a General Linear Model of technical and irrigation water use efficiency scores was performed, including the significant variables and their two-order interactions applying the two way ANOVA procedure. For these statistics the SigmaStat software was used. Appling the two way ANOVA procedure, SigmaStat does not have an automatic nonparametric test if the assumptions of the normally distribution with the same variance are violated.

5.3. Results

5.3.1. Hydraulic results

Results showed that the application efficiency was of 100% in all cases. Sol samples before and after irrigation events showed that farmers apply low water depths. In contrast, there was variability in the On-farm distribution efficiency and the uniformity of distribution (Tableau 10). In surface irrigation, the On-farm distribution efficiency vary between 36%, on plots far from the water point of the farm and 100% on the plots which are near the water point of the farm with a median value of 80%. The uniformity of distribution ranged from 63%, on Strip check method, to 91% on olive trees irrigated with basin method. With sprinkler technique, the On-farm distribution efficiency could be poor (54%) because of outdated equipment as it can be good (88%) for farmers who could renew pipelines. The Christiansen uniformity coefficient varies from 58 to 89%. In trickle technique, a poor management of the technique has been noticed. Outdated state of equipments, the inadequacy of the filtration post with the flow rate and clogging of distributors affect strongly the On-farm distribution efficiency and the distribution uniformity of emitters. The coefficient of uniformity of emitters varies from 20% to 86% with a median value of 61% and the On-farm distribution efficiency from 54 to 83%. Poor On-farm distribution efficiency lead to great loss in water volumes destined to the profit of crops. The on farm monitoring showed that the hydraulic performances of some farms are dictated by the constraints of the public network. The On-farm distribution efficiency and the distribution uniformity vary obviously from a plot to another depending on the availability of the flow and the pressure, the quality of the used equipment and depending on the skills of the farmer.

Tableau 10. Statistics for measured hydraulic indicators

	On-farm distribution efficiency(%)	Uniformity of distribution (%)
Mean	74	72
Minimum	36	20
Maximum	100	91
Standard deviation	19	16

5.3.2. Conventional economic indicators

Crops adopted in this irrigation scheme are olives, wheat, tomatoes and fruit. All the production of tomato is for manufacturing, the price remains the same, set at 0.098 DT/kg. The selling prices of olive are 0.6 DT/kg and 0.8 DT/kg respectively for oil olive and table olive. As the irrigated area is located near the capital (30 km), most farmers sell their fruit to the wholesale market for 0.8 DT/kg. The price of wheat which is 55DT/100 kg is set by the government. The results of descriptive statistics of economic data in relation to variable costs, gross margins and yields are summarized in Tableau 11.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tableau 11. Descriptive statistics of economic data related to crop surfaces (S) variable costs (VC), gross margins (GM) and yields, (DT: Tunisian dinar, 1 DT=1.8 €)

Crop		Mean	Median	Min	Max	Coefficient of variation
Olive	S(ha)	3.35	2.75	1.00	7.00	0.47
	VC(DT/ha)	478	432	237	807	0.37
	GM(DT/ha)	1345	1064	111	3441	0.64
	Yield(Kg/ha)	2604	2390	750	6000	0.51
Fruit	S(ha)	1.41	1.38	0.25	2.50	0.43
	VC(DT/ha)	2121	1649	642	5767	0.69
	GM(DT/ha)	1954	1901	662	3385	0.40
	Yield(Kg/ha)	5905	5000	3000	18000	0.65
Tomato	S(ha)	1.58	1.75	1.00	2.00	0.28
	VC(DT/ha)	3426	3368	2556	4042	0.14
	GM(DT/ha)	3344	3846	499	5556	0.55
	Yield(Kg/ha)	69080	72500	35714	95000	0.31
Wheat	S(ha)	2.35	2.00	1.00	6.00	0.57
	VC(DT/ha)	454	433	31	958	0.47
	GM(DT/ha)	1169	1042	608	1912	0.36
	Yield(Kg/ha)	2648	2500	1520	4000	0.26

The results showed that the yield of olive trees varies between 0.75 and 6 T/ha with an average for all farmers of 2.6 T/ha and a coefficient of variation of 0.52. The Tunisian standard for the region is of 2.5 T/ha (DGPA, 2008/2009). For wheat, the yield varies from 1.5 to 4 T/ha with an average of 2.6 T/ha and a coefficient of variation of 0.26. For tomato, the average yield is 67 T/ha, a little higher than the half of the Tunisian standard. For fruit the average yield was 5.9 T/ha, which is overwhelming in comparison with Tunisian standard which are 18 to 20 T/ha although variable costs to produce 1 kg was almost the same, 0.3 DT/kg.

The analysis of the gross margin (GM) in relation to the yield and the On-farm distribution efficiency showed that the GM was highly correlated to the yield. On the contrary, the On-farm distribution efficiency was not significant indicator for the GM differences (Tableau 12).

Tableau 12. Analysis' results of the gross margin (GM) in relation to gross margin (GM) and the On-farm distribution efficiency (DE).

	Pearson Product Moment Correlation First variable : GM Second variable : Yield		ANOVA one way(*) Data point: GM Factor: DE
Crop	Correlation coefficient	P value	P value
Olive trees	0.982	<0.001	>0.005 (**)
Fruit orchard	-	>0.005	>0.005
Tomato	0.809	<0.005	>0.005
Wheat	0.746	<0.001	- (***)

(*) The ANOVA one way was used as we dispose classes of the On-farm distribution efficiency.
(**) ANOVA on ranks

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(***) the majority of wheat plots are rain-fed

In the next section, technical efficiency scores will be estimated and analyzed to find out the main determinants of the performance at plot scale.

5.3.4. Efficiency scores

Calculations with the DEAP program provided technical efficiency (TE) scores and irrigation water use efficiency (IWUE) scores for each crop of each individual farm. Basic statistics for these efficiency scores are reported in Tableau 13.

Tableau 13. Basic statistics for TE and IWUE for olive, fruit orchards, tomato and wheat

	Olive		Fruit		Tomato		Wheat	
	TE	IWUE	TE	IWUE	TE	IWUE	TE	IWUE
Mean	0.66	0.35	0.86	0.68	0.86	0.64	0.85	0.35
Min	0.19	0.01	0.59	0.32	0.56	0.41	0.44	0.01
Max	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Standard deviation	0.27	0.41	0.14	0.27	0.16	0.22	0.19	0.49
Coefficient of variation	0.41	1.17	0.17	0.39	0.18	0.34	0.87	0.87
Mean scale efficiency	0.78	0.24	0.95	0.94	0.93	0.76	0.89	0.71

The mean values of the TE for fruit orchards, tomato and wheat show that the majority of plots are operating at an efficient level (0.85) and efficient scale (about 0.90). Yet for olive trees, plots are operating at a less efficient level (0.66) and scale (0.78) (Tableau 13). So, for olive trees, observed outputs could have been increased by 34 % using the same inputs. On the other hand, the average IWUE scores were substantially less than the TE scores for the four crops, especially for olive and wheat. The scale efficiency was of 0.24 for olive trees showing that IWUE was affected by the scale of the operation.

5.3.5. Analysis of efficiency scores

5.3.5.1. Technical efficiency

The variance analysis of the technical efficiency scores summarized in Tableau 14, showed no significant differences between the distribution sectors-gravity or under pressure-and between the irrigation techniques. Even, the net water depth was not a significant indicator for the technical efficiency on this irrigation scheme. For olive trees, as showed in Tableau 14, differences in technical efficiency were significant with respect to on-farm distribution efficiency, to access to water and highly significant with respect to mechanization and yield. In the case of tomato and fruit orchards, results showed that the only determinant factors for technical efficiency were the access to water and the yield. For wheat, being a winter crop, the majority of plots are rain-fed. Some plots have received only one complement irrigation. Neither irrigated or not was significant indicators in our studied sample.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tableau 14. Mean technical efficiency for different sources of variation at the plot level.One-way analyses of variance using parametric tests (the assumptions of the normally distribution with the same variance were full for all the samples)

Sources of variation	Technical efficiency		
	Olive	Fruit	Tomato
Distribution sector	NS	NS	NS
	0.691	0.877	0.875
Gravity distribution	0.629	0.852	0.855
Under pressure distribution			
Irrigation technique		NS	
	All with surface	0.823	
Surface	technique	-	
Sprinkler		0.889	All with trickle
trickle			technique
On-farm distribution efficiency (DE)	P = 0.035	NS	NS
	0.535	0.900	0.876
DE < 80 %	0.766	0.831	0.781
DE >= 80 %			
Access to water	P = 0.032	P = 0.023	P = 0.020
	0.743	0.991	0.930
Easy access	0.495	0.808	0.719
Difficult access			
Net water depth (mm)	NS	NS	NS
*For olive			
	0.599		
DN < 100	0.784		
DN > 100			
*For fruit and tomato		0.878	0.742
		0.817	0.899
DN < 300			
DN > 300			
Mechanization availability	P = <0.001	NS	NS
	0.908	0.830	0.888
Farmer has a tractor	0.512	0.878	0.850
Farmer has not a tractor			
Yield	P = <0.001	P = <0.001	P = 0.002
*For olive			
	0.509		
Yield < 2500 Kg/ha	0.913		
Yield > 2500 Kg/ha			
*For fruit		0.630	
		0.924	
Yield < 3000 Kg/ha			
Yield > 3000 Kg/ha			0.690
*For tomato			0.945
Yield < 60000 Kg/ha			
Yield > 60000 Kg/ha			

In a second step, the significant indicators for every crop were included in a General Linear Model to conclude about interactions between them. For olive trees and fruit orchards results showed that, in our sample, there was no significant interaction between significant indicators. However, for tomato there was a significant interaction between the yield and the

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

access to water (P = 0.028). Figure 19 affirm that under difficult access to water, the technical efficiency was sensitive to yield; it decreases from 1 if the yield > 60 000 Kg/ha to 0.625 if the yield < 60 000 Kg/ha. Under easy access to water the technical efficiency was not sensible to the yield.

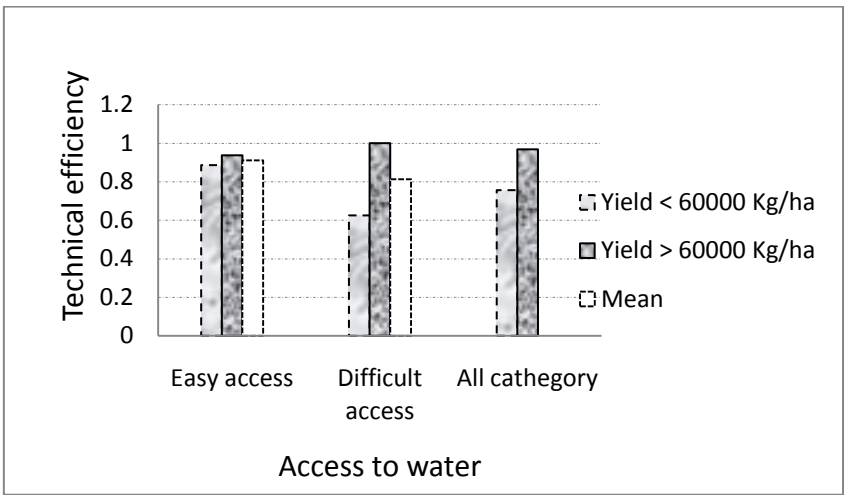


Figure 19. Mean technical efficiency for tomato according to the yield and the access to water

(The assumptions of the normally distribution with the same variance are violated)

5.3.5.1. Irrigation water use efficiency

The variance analysis of IWUE scores summarized in Tableau 15 showed no significant differences between the distribution sectors-gravity or under pressure-and between the irrigation techniques. However, the access to water was significant indicator for IWUE for the tree crops. In our sample the yield was significant indicator for olive trees and tomato.

The interaction between the yield and the access to water was even significant (p = 0.035) for olive trees (Figure 20). Under difficult access to water the IWUE was significantly sensible to the yield, it can decreases from 1 to 0.32. However under easy access to water, the IWUE was not sensible to the yield.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tableau 15. Mean/Median IWUE for different sources of variation at the plot level.

One-way analyses of variance using Parametric test comparing the samples arithmetically if populations are normally distributed and the variances of the populations are equal and the Kruskall-Wallis ANOVA on ranks if not.

Sources of variation	IWUE		
	Olive trees	Fruit	Tomato
Distribution sector Gravity distribution Under pressure distribution	NS 0.601 0.662	NS 0.658 0.777	NS 0.803 0.741
Irrigation technique Surface Sprinkler trickle	All with surface technique	NS 0.742 0.729	All with trickle technique
On-farm distribution efficiency(DE) DE < 80 % DE >= 80 %	NS 0.573 0.681	NS 0.734 0.735	NS * 0.776 0.695
Access to water Easy access Difficult access	P = 0.004 0.743 0.407	P = 0.005 0.664 0.911	P<0.001 0.882 0.504
Yield *For olive Yield < 2500 Kg/ha Yield > 2500 Kg/ha *For fruit Yield < 3000 Kg/ha Yield > 3000 Kg/ha *For tomato Yield < 60000 Kg/ha Yield > 60000 Kg/ha	P = 0.005 0.511 0.832	P = 0.005 0.572 0.779	P = 0.004 0.541 0.864

(*): Median value using Kruskall-Wallis ANOVA on ranks
NS: Not significant

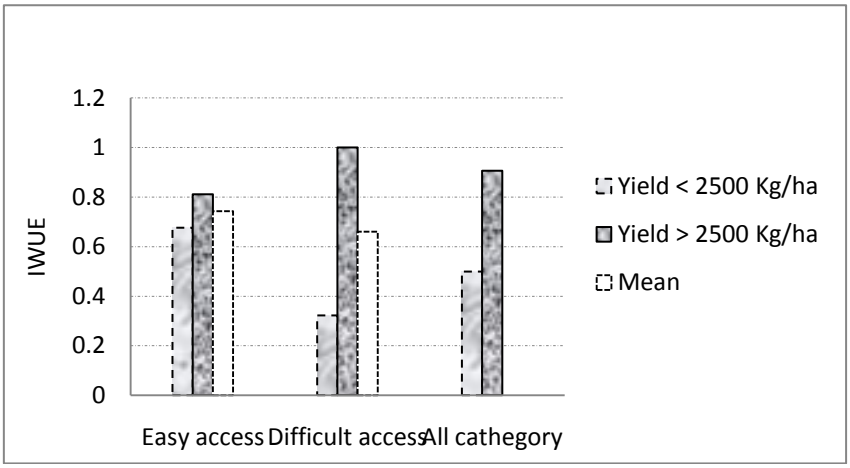


Figure 20. Mean IWUE for olive trees according to the yield and the access to water

(The assumptions of the normally distribution with the same variance are full)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

5.4. Discussion

This research has attempted to analyze the irrigation systems' performance into a holistic approach to understand the relationship between hydraulic, agronomic and economic performance of irrigated systems including other factors of the production process. Results showed that hydraulic performance does not correlate with economic performance.

In our case study the water application efficiency was 100 % for all plots. In the contrary, there was a great variability in other hydraulic indicators of performance. It seems that the On-farm distribution efficiency is the most pertinent indicator; it ranged from 36% to 100%. The poor on-farm distribution efficiency denotes a serious source of water waste. Even the average IWUE performed poorly, it was only 0.35 for olive trees and wheat and about 0.65 for fruit orchard and tomato. So, keeping the inputs constant, the outputs could be increased by 65% for olive trees and wheat and by 35% for tomato and fruit orchard by better water management. Other studies were conducted in Tunisia to evaluate the IWUE at different locate and with different crops. Frija et al (2009) found that the IWUE was 42%, at farm level, in horticultural greenhouse, adopting pepper, tomato and melon, located in the eastern central area of Tunisia. Dhehibi et al. (2007) evaluated the water inefficiencies to 47% at plot scale for citrus production in Cap Bon (North east Tunisia). Also Albouchi et al (2005) evaluated IWUE to 53% in the Kairouan region. So, great potential exist to save water and to promote its value. Then, what are the determinants of the IWUE? The results of ANOVA showed that the access to water was significant for the IWUE differences but not the On-farm distribution efficiency. So water waste caused by poor On-farm distribution efficiency does not affect the IWUE. On the contrary, the yield, as a result of some technological package, was significant for IWUE. The analysis of the interaction between significant factors worth a great attention; if the yield was significant factor for the IWUE, its interaction with the access to water -as shown in Figure 20- for olive trees- let one conclude that under easy access to water the IWUE was not sensible to the yield. So, farmers have no shortage of agronomic skills but the access to water that was the most determinant factor for IWUE.

As regard to economic aspects, the majority of farms are operating at an efficient level in spite of poor On-farm distribution efficiency. In fact, irrigation water costs are significant only for olive trees in comparison with other costs. In such context characterized by the absence of the intensification and the concurrence, water lost does not worth great importance. On the contrary of the yield and the access to water, the net water depth was not significant factor for the technical efficiency differences despite the usual positive response of the yield to water. In the context of this irrigation scheme, the access to water present a more sever constraint to crop production than the water availability in quantity. Hanafi et al (2011) have studied the actual irrigation water demand and the supply of the network in this irrigation scheme and showed that the net work can provide only 65% of the irrigation water demand taking account of irrigation efficiencies. Surely this constraint affect negatively crop production but the quality of access to water, which determine not the water depth but the time of water application, seems to be more determinant for the TE. Same as for the IWUE, the analysis of the interaction between the yield and the access to water showed that the difficult access to water makes the most serious constraint for better TE.

In Tunisia, a modernization plan was programmed for the old irrigation schemes of the Medjerda. Began to occur in 2010, it aims at changing the gravity water distribution system by an under pressure one. The irrigation scheme support of our study, which will be in a later modernization plan, is representative for these schemes. Our results suggest that the distribution sector, gravity or under pressure, was not significant variable neither for TE nor for IWUE(Tableau 14, Tableau 15). So, although farmers on the gravity distribution sector have invested much costs for water irrigation-by investing more to make under pressure their water systems - then on the under pressure sector, they were almost at the same efficiency

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

level. As said before, the access to water was highly significant for the technical efficiency and for the IWUE. In our sample, on the gravity sector 67% of farms have easy access to water yet on the under pressure, where some farms are pumping in the River or in their private well, 57% have easy access to water. Furthermore it is easier to have a higher outflow on the gravity sector than on the under pressure sector because of the low pressure at some points of the net work. These constraints were obstacles to farmers on the under pressure sector to have better efficiencies. Although the gravity distribution sector has its problems of upkeep and illegal water carrying, versus pan problems of the under pressure distribution, it is necessary to think about the objectivity of investment for the conversion of the distribution network. Giving attention to ameliorate the access to water and controlling the illicit extension of the number of water gates seems to be important for better water management without any huge investments.

Ameliorating the access to water can lead to better TE and better IWUE but not to better hydraulic efficiency at plot scale, where poor on-farm distribution efficiency is a source of a considerable water waste in a water scarcity context. Even the TE and the IWUE could be better with surface technique than with trickle technique. A poor hydraulic efficiency was due to an up dated of the majority of equipments. How one can expect that farmers deal with improving the hydraulic efficiency while this latter was not significant for the gross margin which is the main objective of the farmer? The National Irrigation Water Saving Program provides subsidies ranging from 40 to 60% to encourage little farmers who have difficulties to investment for granting new and modern irrigation equipment. In fact farmers, on this irrigation scheme, have no chance to benefit from these subsidies for different problems. In this context, the community objective of improving the hydraulic efficiencies do not matches the farmer objective which is the greater economic benefit especially in limited farmers' investment case. The improvement of hydraulic efficiencies can be by giving attention to really apply the program of subsidies with assisting farmers to have adequate equipments or by rectifying the irrigation water costs. Water resources shouldn't be regarded as inexhaustible it should be considered as an economic factor. It can be important to notice that the increase in the price of water can become a blocking factor and a decline of irrigated agriculture when it is associated to low levels of intensification (Sghaier, 1995). It is also recommended that decision-makers focus on better vulgarization services and on enhancing farmer's knowledge by training to make them aware of the water save utility for a better water productivity and intensification level.

This study is a contribution to understand the performance from different angles and its relevant indicators and their interaction. Our results make a justification for our holistic approach based on building a representation proper to local and actual context trough on farm monitoring and observation. It is hoped that results may be useful in development especially that the Tunisian government is preparing for rehabilitation and modernization of irrigation schemes like the one area of study. The holistic approach outlined should be replicated in other irrigation schemes to depict their proper pertinent lever for better performance in their specific context. It would be interesting to study some scenarios of the possible increase of irrigation water costs to incite farmer to save water. This study has taken a step in the direction of a holistic approach to define significant factor for the performance at plot scale. But the farm is seen as the relevant unit of decision, performance indicators would be also analyzed in a holistic approach at the level of the farm considered as a set of plots in interaction between themselves and interacting with other activities such as livestock.

5.5. CONCLUSION

In this study, a split-up of domain has been chosen to analyze irrigation systems' performance in a holistic approach by studying the relationship between hydraulic, agronomic and economic performance including other factors of the production process in a public irrigation

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

scheme in northern Tunisia. On farm hydraulic measurements and monitoring of irrigation events were processed to evaluate hydraulic indicators on each individual plot. Then results of detailed techno-economic survey were used to estimate technical and irrigation water use efficiencies. Finally, statistical variance analysis was used to evaluate a set of significant indicators and their interaction to depict effective and pertinent lever to better performance. This study showed that hydraulic performance, which has been widely studied with the aim of improving water management, does not always has an impact on economic performance, which is the most important aim of farmers. In the context of the irrigation scheme support of this study, some farmers' strategies are economically justified, but can lead to poor hydraulic performance.

As regard to economic aspects, the majority of farms are operating at an efficient level; the technical efficiency was about 0.85 for fruit orchards, tomato and wheat and only 0.66 for olive trees. The On-farm distribution efficiency perform poor, it ranged from 36% to 100% showing the existence of a great water waste. The IWUE was only 0.35 for olive trees and wheat and about 0.65 for fruit orchard and tomato showing the possibility of significant increase of outputs keeping the same inputs by better water management. The analysis showed that the access to water was the pertinent lever for better technical and irrigation water use efficiencies, from the current situation.

The on-farm distribution efficiency was acknowledged to be the most pertinent hydraulic indicator. It was not significant for the economic performance which is the main objective of the farmer. The explanation was that irrigation water costs are not significant in relation to other production costs. Suggestions to overcome this dilemma of the divergence of the community and the farmer objectives are to give a serious attention for the application of the subsidies national plan or to increase the water cost in order to consider water as a production factor. The second suggestion would be conjugated to according attention to illicit extension of private pumping.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 6 : Performance des exploitations agricoles: démarche globale d'analyse et tests de scénarios

Nous rappelons que, dans un contexte aussi marqué par la remise en question de la rentabilité des systèmes irriguées qui n'ont pas atteint leurs objectifs, notre travail de recherche se propose d'élaborer une réflexion selon une approche globale pouvant apporter des éléments de réponse à ce problème, en analysant les performances des exploitations agricoles en irrigué dans sa dimension transdisciplinaire. Dans ce chapitre, nous proposons une démarche globale d'analyse de la performance à l'échelle de l'exploitation, nous permettant d'évaluer l'impact de scénarios d'amélioration définis à partir d'indicateurs pertinents. Outre l'état de la science, notre étude permettra aux décideurs de savoir sur quels leviers ils pourront agir pour améliorer la performance, surtout que le périmètre objet de cette étude se prépare pour un projet de modernisation.

6.1 Introduction

Depuis des années, l'analyse des exploitations est faite par secteur (irrigation, production animale, production végétale, finances,…), chaque secteur étant traité par un spécialiste. L'ingénieur de l'eau étudie les besoins en eau des cultures et l'efficience avec laquelle elle est mise à la disposition des cultures. Les agronomes considèrent l'exploitation sous l'angle de vue des parcelles cultivées, en s'intéressant au bilan de fertilité, rendements, variétés employées, etc... Le comptable juge les performances à travers des critères et des ratios divers : marge brute, bénéfice,… Cette analyse sectorielle et simplificatrice de l'exploitation agricole ne considère pas les relations mutuelles entre secteurs. Par conséquent, le jugement porté sur le fonctionnement de l'exploitation se fait discipline par discipline et les performances réalisées dans chacun de ces secteurs sont alors comparées à des normes techniques ou économiques sans se référer aux différentes contraintes subies par ces exploitations agricoles. L'objectif admis est de maximiser la performance de chacun des secteurs sans proposition de guide pour l'améliorer. Par conséquent, et malgré les efforts des spécialistes et l'intervention de l'Etat, la productivité des ressources reste limitée, surtout dans les périmètres irrigués collectifs, et les rendements observés en milieu réel restent généralement inférieurs à ceux obtenus dans des milieux contrôlés (Warrick, 1989; Howell et al., 1990; Kijne, 1998). Pour cela, il serait pertinent d'étudier les systèmes irrigués qui se basent en grande partie sur la gestion de l'eau, compte tenu du contexte général (Dechmi, 2003).

Prathapar et al., (1997) ont étudié la sensibilité de la production du riz en fonction de la taille de l'exploitation, la limitation en eau d'irrigation, les conditions climatiques et notamment les précipitations, la salinité du sol, le niveau de la nappe, les conditions de drainage et les revenus de l'exploitation. Kuper et Habib (2002), ont mené des travaux sur la gestion de la salinité par l'irrigation au Pakistan en la considérant comme une contrainte de l'agriculture irriguée. Khan et Hanjra (2008), ont modélisé des dynamiques des bilans hydriques et salins selon une approche intégrée, en mettant l'accent sur les dimensions hydrologiques, économiques, agriculturales et environnementales, mais aussi sur les pratiques d'adaptation des agriculteurs. D'autres approches également, notamment le 'benchmarking' ou 'analyse comparative' se sont progressivement affirmées. Elles reposent sur l'évaluation comparative des performances des systèmes, afin d'appréhender les facteurs occasionnant un décalage entre les performances réelles et celles attendues suite à la réhabilitation d'une ou plusieurs composantes des systèmes irrigués (Kloezen et Garcés-Restrepo, 1998; Kotb et al., 2000; Malano et Burton, 2001). Ces approches sont nées suite au constat fait de l'incapacité des approches mono-disciplinaires à appréhender la réalité du fonctionnement des problèmes de gestion et les déterminants des faibles productivités observées dans les aménagements hydro-agricoles. Les approches multidisciplinaires mobilisent et organisent les acquis de plusieurs disciplines, en particulier l'hydraulique, l'agronomie et l'économie, en fonction d'un objectif

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

donné. Lorite et al. (2004) considèrent même que chaque périmètre irrigué a ses particularités qui nécessitent des procédures d'évaluation de la performance faite sur mesure et qui doivent être adaptées aux conditions locales; ainsi, de pertinentes estimations peuvent être faites.

En Tunisie, l'Etat a investi depuis les années 60 dans la grande hydraulique pour la mobilisation de l'eau et dans l'aménagement des périmètres public irrigués. Dans le cadre d'une double politique d'économie d'eau et de sa valorisation, de nouveaux investissements ont été consentis pour la réhabilitation et la modernisation visant l'amélioration de l'efficience hydraulique à l'échelle des périmètres. De même, depuis 1995, l'Etat tunisien a adopté un nouveau programme national d'économie d'eau visant sa meilleure valorisation économique. Pour ce, des subventions pour l'acquisition d'équipements d'économie d'eau de 30 à 60% ont été accordées aux agriculteurs. En dépit de ces efforts, la valorisation des facteurs de production (eau, terre, capital) reste faible et la performance des exploitations familiales agricoles, qui représentent 73% des exploitations agricoles ayant une superficie inférieure à 10 ha (CEA, 2008), reste modeste par rapport à l'optimal. Les premières exploitations des aménagements hydrauliques n'avaient pas le souci de la dimension globale de l'espace rural, et de nouvelles approches économiques, sociales et institutionnelles de la gestion ont émergé par la suite. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce chapitre, où l'usage de l'eau et d'autres facteurs de production dans les périmètres irrigués montrent que les difficultés méthodologiques pour évaluer la performance à l'échelle de l'exploitation agricole, sous l'effet de plusieurs contraintes en interaction, n'ont pas été surmontées. On se propose ainsi d'analyser la performance globale à l'échelle de l'exploitation, centre de décision de l'agriculteur, surtout que l'Etat tunisien se prépare pour un projet de modernisation et de réhabilitation d'un ensemble de périmètres irrigués de la vallée de la Medjerda. Des interrogations peuvent se présenter quant à l'objectivité des interventions : quels sont les systèmes de production agricoles qui peuvent assurer à la fois une rentabilité économique pour l'agriculteur tout en valorisant au mieux les ressources naturelles (eau et sol)? Sur quels leviers peut-on agir pour améliorer la performance globale, y compris celle de l'usage de l'eau à l'échelle de l'exploitation? Quels sont les scénarios possibles pour une allocation efficiente des facteurs de production, notamment l'eau?

Il s'agit de proposer une approche globale d'évaluation de la performance à l'échelle de l'exploitation dans un milieu réel caractérisé par une interaction entre différents facteurs. Les facteurs susceptibles d'influencer la performance de l'exploitation agricole sont nombreux (facteurs social, institutionnel, politique, savoir-faire,…) et ne peuvent pas être tous considérés dans cette étude. A la lumière de la phase de diagnostic faite au chapitre 3, des mesures hydrauliques présentées au chapitre 4 et de l'analyse de la performance à l'échelle de la parcelle faite au chapitre 5, il nous semble important d'orienter notre définition de scénarios vers la mise en évidence de (i) l'importance de la contrainte de disponibilité en eau et de sa distribution vers la parcelle, et (ii) les indicateurs pertinents de la performance à l'échelle de l'exploitation.

Notre objectif est de déterminer les leviers de la performance globale en vue de son amélioration. Les simulations de scénarios définis à partir de ces leviers et le calcul de leur impact représentent une justification de leur validité.

6.2. Méthode

6.2.1. Indicateurs économiques partiels

Les résultats détaillés de l'enquête technico-économique et ceux de mesures hydrauliques *in situ* ont été organisés dans un modèle de gestion de base de données afin de générer des indicateurs d'évaluation de la performance. Nous avons calculé la productivité de l'eau, du sol et des charges variables. Ces indicateurs économiques partiels ont été calculés relativement à la marge nette (marge nette/m³ d'eau, marge nette/hectare, marge nette/charge variable) pour

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

différentes secteurs : olivier, fruits, maraichage, blé et élevage. Le revenu net a été calculé à l'échelle de l'exploitation.

Nous définissons les termes économiques utilisés dans ce travail à cause de la diversité des termes dans la littérature. Nous désignons par *marge brute* la valeur totale de la production (ou chiffre d'affaire) diminué de l'ensemble des charges variables (ou charges intermédiaires) y compris la charge de la main d'œuvre occasionnelle. La *marge nette* à l'échelle de la parcelle ou de l'activité de l'élevage désigne la marge brute diminuée de l'amortissement des vergers ou du cheptel. Le *revenu net* de l'exploitation désigne la marge brute de l'exploitation diminuée de l'ensemble des amortissements et de la rémunération de la main d'œuvre familiale. La rémunération du travail familial est incluse seulement à l'échelle de l'exploitation dans le calcul du revenu net, pour échapper au problème de rémunération par parcelle. Nous affectons un prix de la main d'œuvre familiale égal au SMAG (Salaire Minimum Agricole Garanti) qui est de 8.9 DT/jour, soit 3250 DT/an et, se basant sur la connaissance du terrain, en supposant que le travail familial est équivalent à 2 actifs agricoles par exploitation. L'amortissement des vergers est comptabilisé sur les bases suivantes : la durée de vie du pêcher est de 12 ans en considérant le prix actuel du pied, qui est en moyenne de 4.5 DT. Pour le poirier et le pommier, la durée de vie est de 18 ans en considérant le prix actuel du pied qui est de 2.5 DT. En élevage la durée de lactation d'une vache laitière est de 7 ans, son prix actuel est de 4 000 DT et vaut 800 DT après 7 ans de lactation. Par contre, la valeur de fermage, des équipements (réseau d'irrigation) et des bâtiments, qui sont déjà amortis, n'est pas incluse dans le calcul de la marge nette.

Comme ces indicateurs partiels ne reflètent pas la résultante de l'ensemble des performances d'utilisation des différents facteurs de production et leur interaction, l'efficience technique a été calculée pour surmonter cette limite.

6.2.2. Niveau d'efficience technique et d'utilisation de l'eau

L'estimation de l'efficience économique permettrait de caractériser d'une manière combinée les inefficiences techniques et allocative. Dans notre étude, on s'est intéressé uniquement à l'efficience technique qui permettrait de caractériser les inefficiences productives des unités.

Comme au chapitre 5, le programme DEAP (Coelli, 1996) a été utilisé pour calculer les scores d'efficience technique et d'utilisation de l'eau à l'échelle de l'exploitation tel qu'ils sont définis dans la section (ch5.§ 5.2.3), moyennant une analyse d'enveloppement des données (DEA) en considérant l'option rendement d'échelle variable. Dans ce chapitre, pour considérer l'eau comme un bien non marchand, nous introduisons le prix des produits et des facteurs en valeur monétaire mais le facteur eau a été introduit en quantités et non pas en valeur monétaire. Les données entrées pour ce programme sont cités ci-dessus :

Pour l'efficience technique à l'échelle de l'exploitation

Output :	Valeur de la production totale (cultures+élevage)
Input 1 :	Ensemble des charges variables
Input 2 :	Volume d'eau d'irrigation total utilisé à l'échelle de l'exploitation
Input 3 :	Superficie cultivée
Input 4 :	Nombre de têtes de vache

Pour l'efficience de l'utilisation de l'eau à l'échelle de l'exploitation

Output :	Valeur de la production totale (cultures+élevage)
Input :	Volume d'eau d'irrigation total utilisé à l'échelle de l'exploitation

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

6.2.3. Analyse des déterminants du niveau d'efficience à l'échelle de l'exploitation.

Les exploitations agricoles se trouvent sur un même type de sol, obéissent à une même situation de marché et pratiquent les mêmes cultures sur une superficie plus ou moins équivalente; les déterminants de l'efficience peuvent donc être supposées les mêmes. L'analyse des scores d'efficience à l'échelle de la parcelle, faite au chapitre 5, nous a fait écarter certaines variables comme l'indicateur de performance hydraulique, la technique d'irrigation et le mode de distribution, gravitaire ou sous pression.

Plusieurs analyses statistiques ont été utilisées pour étudier l'influence des différents facteurs déterminants telles que les analyses de corrélations, les régressions multiples, les analyses de variance ou encore des approches de courbes enveloppes (Casanova et al., 1999; Kitchen et al., 2003; Okuyama et al., 2005; Oktem, 2008). Dans notre cas, une analyse de variance (ANOVA à un facteur) a été faite pour étudier la pertinence des variables étudiées. Si la distribution de la variable n'est pas normale, la méthode de Kruskal-Wallis ANOVA 1 facteur a été choisie et la médiane de chaque groupe du facteur dépendant est calculée.

Les moyennes ou les médianes des scores d'efficience, relatives à l'accès à l'eau, aux ressources financières, à la pratique de l'élevage et à la classe de structure dégagée par la typologie présentée dans le chapitre 3, ont été calculées.

L'accès facile aux ressources financières se traduit par la contribution des membres de la famille ayant un travail en dehors de l'exploitation familiale. Ainsi, l'accumulation de profit est un palier pour l'amélioration du revenu de l'exploitation. En effet, ceux qui ont une disponibilité aux ressources financières sont propriétaires de plus de 4 vaches laitières, ce qui leur garantit une liquidité pour faire face aux différentes dépenses. L'accès facile à l'eau se traduit par un emplacement favorable qui garantit une pression nécessaire sur le réseau de distribution sous pression, un accès aux ressources d'eau auxiliaires et la possibilité de construction d'un bassin de stockage, ce dernier découlant de l'accès aux ressources financières. Ces deux indicateurs ont été renseignés pour chaque exploitation sur la base des observations de terrain. La disponibilité de la main d'œuvre familiale et le type de revenus externes ainsi que les problèmes de trésorerie sont renseignés pour chaque exploitant. Cette analyse a été faite en utilisant le logiciel SigmaStat présenté au chapitre 5 (ch.5 § 5.2.5).

6.2.4. Définition et simulation de scenarios

Les déterminants de l'efficience peuvent être soit internes et, dans ce cas la décision se prend à l'échelle de l'exploitation si cela est possible (exemple : spéculation adoptée), soit externes (accès à l'eau, disponibilité en eau, subventions, accès aux ressources financières,…), et dans ce cas les décisions se prennent par l'Etat. Dans ce dernier cas, des scénarios ont été définis en fonction des déterminants de l'efficience. Pour justifier la validité du scénario d'amélioration, sa simulation et la quantification de ses effets sur la valorisation des facteurs de production, notamment l'eau et sur le revenu de l'agriculteur, s'avèrent nécessaires. La définition de scénarios s'est basée sur les résultats de l'analyse des scores d'efficience qui déterminent les leviers sur lesquels il faut agir. Ces scénarios seront définis, simulés et présentés dans la section résultats.

6.3. Résultats et discussions

6.3.1. Situation de référence actuelle

6.3.1.1. Valorisation des facteurs de production

Nous analysons quelques indicateurs de performance usuels qui nous permettent de tirer certaines conclusions surtout que la taille des exploitations ne présente pas un différentiel significatif; la surface agricole utile moyenne est de 7 ha avec un coefficient de variation de 0.22. La surface cultivée est en moyenne de 6.38 ha avec un taux d'intensification cultural

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

variant de 0 à 49%. Nous désignons ici, par taux d'intensification cultural le rapport de la superficie cultivée à la superficie assolée. La valorisation moyenne en termes de marge nette dégagée par les facteurs de production terre, eau et input variable est résumé dans le tableau 16.

Tableau 16. Valorisation moyenne en termes de marge nette (MN) des facteurs de production terre, eau et input variable (MN/superficie, MN/volume d'eau d'irrigation, MN/input variable) par les différentes spéculations adoptées

		Valorisation moyenne en termes de marge nette* des facteurs de production		
	S_{moy} (ha)	Terre (DT/ha)	Eau (DT/m³)	Input variable (DT /DT)
Olivier	3.43	1373	1.2	3.1
Fruits	1.41	1798	0.6	1.2
Tomate	1.63	3598	0.5	1.0
Blé	2.5	1132	2.5	5.0
Elevage	0.43**	3470	2.7	2.0

* : La rémunération du travail familial n'est pas incluse
** : Superficie de fourrage par vache

En moyenne, c'est l'activité de l'élevage qui, en termes de marge nette, valorise le mieux le m³ d'eau. Vient en deuxième rang le blé, culture hivernale, nécessitant seulement un complément d'irrigation. L'arboriculture fruitière et la tomate valorisent moins le m³ d'eau que l'olivier: le m³ d'eau en olivier dégage une marge nette de 1.2 DT, à peu près le double de ce que dégage le m³ d'eau en tomate et en fruit. Quant à la valorisation des charges variables, c'est le blé qui dégage la plus haute marge nette : 1 DT de charges intermédiaires dégage une marge nette de 5 DT. Vient l'olivier en deuxième rang, puis l'élevage, les fruits et la tomate. En dehors de l'activité de l'élevage, qui utilise plus ou moins de concentré en plus de la superficie du fourrage, la tomate valorise au mieux la terre : 1 ha de tomate dégage un revenu net de 3600 DT.

Quant à l'échelle de l'exploitation, où le travail familial est supposé équivalent à deux actifs agricoles, le revenu net moyen était de l'ordre de 6 600 DT et ce, sans introduire les impôts et les pertes financières et exceptionnelles. Il faut signaler que, sur 15% des exploitations enquêtées, le revenu net est négatif, la rémunération des facteurs de production (charges variables et travail familial) au prix du marché n'étant donc pas assurée. Le revenu net peut chuter à – 4700 DT (Tableau 17)

Tableau 17. Statistiques descriptives des revenus nets des exploitations enquêtées

	revenu net de l'exploitation
moyenne	6635
Min	-4736
Max	19843
écart type	6691
Coefficient de variation	1.01

Ces résultats ont permis de répondre aux interrogations quant à l'extension de la superficie d'olivier et du blé sur un périmètre irrigué destiné au fourrage et à la production de fruits et de cultures maraichères. Le faible revenu net de l'exploitation a fait que les agriculteurs se sont orientés vers la pratique de cultures valorisant l'unité monétaire. L'olivier et le blé ont l'avantage de ne pas nécessiter d'importantes dépenses. En plus de cette valorisation du facteur charges variables, le contexte hydraulique avec ses contraintes de disponibilité d'eau

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

en volume et en pression, accentue cette tendance vers ces cultures beaucoup moins sensibles au stress hydrique et dont leur commercialisation est bien organisée.

Le revenu net moyen de l'exploitation est faible et ne permet pas à l'agriculteur d'acquérir de nouveaux équipements d'irrigation pour remplacer les équipements de distribution actuels qui sont vétustes et à l'origine des faibles efficiences de distribution vers la parcelle.

La plupart des agriculteurs utilisent un réseau d'irrigation goutte à goutte acheté en "deuxième main", les doses d'irrigation appliquées étant semblables à celles apportées par les techniques de surface (ch.4 § 4.2). Le recours à la technique d'irrigation localisée semble être une solution aux problèmes posés par la contrainte de main d'œuvre en technique de surface.

La productivité partielle des facteurs de production peuvent, toutefois, masquer des comportements gaspillants des ressources productives qui sont de plus en plus rares, notamment l'eau. Par exemple, si un secteur valorise l'unité monétaire et non l'eau et la terre, la viabilité des ressources naturelles sera menacée. Dans ce sens il est pertinent, dans l'analyse de la performance des unités de production individuelles, d'étudier l'efficience d'utilisation des facteurs de production, notamment l'eau.

6.3.1.2. Niveau d'efficience technique et d'utilisation de l'eau

Les résultats de calcul résumés dans le Tableau 18 montrent qu'en moyenne, le score d'efficience technique est de 0.84: l'output peut être augmenté de 16% en conservant les mêmes inputs. Le score d'efficience d'utilisation de l'eau est de 0.61 en moyenne: l'output peut être augmenté de 39% en utilisant les mêmes inputs et en gérant mieux l'utilisation de l'eau.

Tableau 18. Scores des efficiences techniques et d'utilisation de l'eau à l'échelle de l'exploitation

	Efficience technique	Efficience d'utilisation de l'eau
moyenne	0.84	0.61
Min	0.39	0.20
Max	1	1
écart type	0.20	0.25
coefficient de variation	0.23	0.42

Nos résultats montrent donc que l'efficience économique, représentée par l'efficience technique, est raisonnable. Par contre, l'efficience de l'utilisation de l'eau est faible avec une large variabilité. Une telle efficience technique, pouvant être réalisée sans valorisation de l'eau, peut être une menace pour la viabilité de cette ressource qui se répercutera négativement, plus tard, sur l'efficience technique. Un contexte de pénurie croissante en eau exige, de manière rigoureuse, une gestion plus économe et plus durable de l'eau. La large variabilité des scores d'efficience montre qu'il existe un potentiel significatif d'amélioration. L'objet de la section suivante est ainsi de trouver les déterminants effectifs de ces scores d'efficience à améliorer.

6.3.1.3. Les déterminants des scores d'efficience à l'échelle de l'exploitation

Les résultats des analyses statistiques des scores d'efficience sont présentés dans le Tableau 19. L'analyse statistique a montré que la classe d'exploitation n'est pas significative pour les différences des scores d'efficiences. Etant donné qu'une classe est caractérisée par l'adoption de spéculations données et d'une technique d'irrigation bien déterminée, les scores d'efficience ne dépendent ni de la spéculation adoptée, ni de la technique d'irrigation utilisée. De même, la pratique de l'élevage n'est pas significative pour les différences des scores de l'efficience technique; par contre, elle l'est pour les scores de l'efficience de l'utilisation de

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

l'eau. L'accès à l'eau est significatif à un seuil de 1% pour la différence des scores d'efficience.

L'examen du troisième quartile montre que, pour un accès difficile à l'eau, l'efficience d'utilisation de l'eau (IWUE) est inférieure à 0.417 pour 75% des exploitations, ce qui montre encore le grand potentiel qui existe pour améliorer la performance par une meilleure gestion de l'eau. De même, l'accès aux ressources financières est significatif pour les différences des scores d'efficience à un seuil de 5%.

L'augmentation continue de la superficie irriguée par rapport à ce qui était programmé par l'étude de base, l'intégration des nouvelles extensions et l'augmentation du nombre de vannes pour une capacité fixe du réseau, ainsi que les disfonctionnements techniques (pannes des pompes, mauvais entretien des conduites, coupure de distribution d'eau suite à l'endettement,…) sont à l'origine de la difficulté d'accès à l'eau.

Ces résultats nous laissent penser que le projet de modernisation des périmètres irrigués de la basse vallée de la Medjerda, qui a commencé à toucher une faible superficie par rapport à ce qui est programmé, doit tenir compte de ces aspects effectifs qui influencent la performance des systèmes irrigués. Bien que le mode de distribution de l'eau, gravitaire ou sous pression, n'était pas significatif pour la différence des scores d'efficience, la conversion du système de distribution gravitaire en un système sous pression peut être justifié. Les mesures d'amélioration de la performance de l'agriculture irriguée ne doit pas se résumer à cette mesure de modernisation, mais elles doivent aussi toucher les critères effectifs déterminants de la performance globale des exploitations agricoles.

Nous présentons ci-après des scénarios d'amélioration définis à partir des déterminants effectifs de l'efficience.

Tableau 19. Médiane/moyenne (M), premier quartile (Q1) et troisième quartile (Q3) de l'efficience technique (TE) et de l'efficience d'utilisation de l'eau (IWUE) pour différentes sources de variation.

Source de variance	TE			IWUE		
	M	Q1	Q3	M	Q1	Q3
Accès à l'eau	**			**		
Accès facile	1.000	0.882	1.000	0.746	0.490	0.966
Accès difficile	0.653	0.506	0.704	0.402	0.299	0.417
Ressources financières	*			*		
Disponibles	1.000	0.911	1.000	0.635	0.463	0.966
Non disponibles	0.729	0.626	0.849	0.412	0.378	0.758
Classe de structure	NS			NS		
Pratique de l'élevage	NS			*		
0 vache				0.591		
Moins de 4 vaches				0.426		
4 vaches ou plus				0.801		

Analyse de variance (ANOVA à un facteur) utilisant (i) le test paramétrique en comparant arithmétiquement les échantillons si les populations ont une distribution normale et les variances sont égales, sinon (ii) la méthode de Kruskall-Wallis est appliquée sur les rangs. Si la distribution est normale, Q1 et Q3 ne sont pas présentés.

(*) : Significatif à 5%
(**) : Significatif à 1%

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

6.3.2. Définition et simulation de scénarios

Dans la situation actuelle, le revenu net moyen de l'exploitation, comme le montre le Tableau 17, ne permet pas l'acquisition de nouveaux équipements. De plus, l'augmentation du coût de l'eau d'irrigation, proposée comme remède (ch.5 § 5.4) pour donner du poids aux charges d'eau d'irrigation et pousser l'agriculteur à renouveler ses équipements et améliorer l'efficience de distribution de l'eau vers la parcelle d'eau, n'est pas la solution pour inciter l'agriculteur à acquérir de nouveaux équipements, faute de revenus suffisants. Au contraire, cela aggraverait sa situation financière. D'où la définition du premier scénario, proposant l'octroi de subventions pour l'acquisition d'équipements.

Les résultats ont montré que l'accès à l'eau et la disponibilité des ressources financières sont les leviers pour l'amélioration de la performance globale des exploitations et de l'ensemble du périmètre. Ce sont donc les deux facteurs sur lesquels il faut agir pour absorber l'inefficience technique et celle de l'utilisation de l'eau à partir de la situation d'équilibre actuelle. Ces leviers permettent de définir deux scénarios d'amélioration. L'un se propose d'améliorer l'accès à l'eau, et l'autre se propose de faciliter, par l'Etat, l'accès aux crédits au profit des agriculteurs qui ne peuvent donner de garanties aux banques, faute de titres de propriété notamment.

6.3.2.1. Scénario 1 : octroi de subventions pour l'acquisition d'équipements

Un programme national d'économie en eau d'irrigation a été adopté depuis 1995 pour l'augmentation du taux des subventions relatives à l'acquisition d'équipements d'économie en eau. Ces subventions, qui peuvent atteindre 60% du coût des équipements, ne sont pas accordés à tous les agriculteurs, surtout ceux qui ne présentent pas de titre de propriété, comme c'est le cas dans le périmètre irrigué objet de cette étude. Dans la situation actuelle du périmètre, ces mesures d'accompagnement de l'Etat sont nécessaires pour la valorisation de l'eau.

Nous étudions donc la mise en place d'équipements d'économie d'eau permettant d'améliorer l'efficience de distribution vers la parcelle pour atteindre 90%.. On se propose d'estimer l'impact de ce scénario sur la capacité du réseau à satisfaire la demande en eau et sur des indicateurs de performance des exploitations, en gardant tout le reste du paquet technologique inchangé, notamment les doses nettes appliquées par culture.

Mesure de l'impact du scénario 1 sur la capacité du réseau à satisfaire la demande en eau

La typologie déjà dressée (ch.3 § 3.3.2) a permis de simuler le scénario 1 à l'échelle du périmètre. On a supposé une efficience de distribution vers la parcelle de 90% qui peut être prise égale à l'efficience globale, car l'efficience d'application est de 100% suite à l'application de faibles doses. Les résultats ont montré que la capacité du réseau à satisfaire la demande théorique en eau d'irrigation durant le mois de pointe passera de 65% à 88% à l'échelle du périmètre irrigué (Tableau 20).

Tableau 20. Impact du scénario 1 sur l'amélioration de la capacité du réseau à satisfaire le besoin brut en eau d'irrigation durant le mois de pointe (juillet)

	capacité/demande initiale (%)	capacité/demande (scénario 1) (%)
Secteur G	42	60
Secteur P	80	105
Total	65	88

Mesure de l'impact du scénario1 sur des indicateurs de performance des exploitations

Les simulations ont montré que le scénario 1 permet une économie d'eau de 19% en moyenne, à l'échelle de l'exploitation. Par contre, son impact sur le revenu net et les scores

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

d'efficience est négligeable. La seule amélioration de l'efficience de distribution vers la parcelle n'a donc pas d'impact sur TE et IWUE, ce qui confirme bien les résultats précédents, obtenus à l'échelle de la parcelle (ch.5 § 5.3.5). Le revenu net a marqué une légère amélioration de 5% due à l'économie sur les frais d'eau d'irrigation qui sont faibles par rapport aux autres facteurs de production. Ces résultats sont résumés dans le Tableau 21.

Tableau 21. Impact du scénario 1 sur le volume brut d'eau d'irrigation, le revenu net, TE et IWUE à l'échelle de l'exploitation

		Etat initial	scénario 1	différence (%)
Volume d'eau (m³)		428 990	349 622*	-19
Revenu net (DT)	moyenne	6 635	6 951	+5
	min	-4 736	-4 425	
	max	19 843	20 335	
TE	moyenne	0.843	0.845	0
	min	0.386	0.392	
	max	1.000	1.000	
IWUE	moyenne	0.606	0.612	+1
	min	0.197	0.224	
	max	1.000	1.000	

* : Volume d'eau brut pour appliquer la même dose que l'état initial de référence
DT : unité monétaire tunisienne, 1DT=1.89 € (2010)

Rappelons que notre objectif n'était pas seulement l'économie en eau, mais l'amélioration de la performance globale. Certes, l'économie en eau est importante pour une meilleure intensification ou conduite des cultures installées, mais la valorisation de tous les facteurs de production, en absorbant les inefficiences techniques et d'utilisation de l'eau d'irrigation, est plus importante. L'analyse des scores d'efficience et d'utilisation de l'eau d'irrigation a montré que l'accès à l'eau et la disponibilité de ressources financières représentent des leviers d'amélioration. D'où la définition de deux autres scénarios par rapport à ces leviers.

6.3.2.2. Scénario 2 : Accès aux crédits

On se propose de simuler un scénario qui consiste à accorder des crédits et d'évaluer son impact sur l'amélioration de l'efficience globale de l'utilisation des facteurs de production ainsi que sur le revenu de l'agriculteur. On a procédé aux étapes suivantes :

- *contribution de la disponibilité de ressources financières* : le test de corrélation de Spearman (corrélation sur les rangs pour une distribution non normale) a montré que le poids de la relation entre la disponibilité de ressources financières et l'ET est de 0.560 (p value=0.003). On peut donc supposer que l'accord de crédits permettra d'absorber 50% de l'inefficience technique.
- TE(scénario 2) = TE ini+ 0.5*(1-TE ini)
- Gain(TE) = TE (scénario 2) – TE ini
- *Calcul du gain sur la production et sur le revenu net* : l'inefficience technique ou productive indique qu'il est possible de produire plus avec le même coût de production. Le gain d'efficience se traduit par un gain sur la production totale, qui est le même sur le revenu puisqu'on produit plus avec les même coûts.
- Output (sénario 2) = output ini + output ini*Gain(TE)
- Revenu net (scenario 2) = revenu net ini + Gain(TE)* revenu net ini

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- *Calcul de l'IWUE* : de nouveaux calculs avec le programme DEAP nous ont permis de calculer la nouvelle IWUE suite à cette mesure d'accompagnement.

Les résultats de simulations ont montré que l'absorption de 50% de l'inefficience technique permet en moyenne un gain de 9% sur l'efficience technique, de 10% sur l'efficience de l'utilisation de l'eau et de 19% sur le revenu net de l'exploitation (Tableau 22).

Tableau 22. Impact du scénario 2 sur l'TE, l'IWUE et le revenu net

	Actuel	scénario 2	gain (%)
TE	0.84	0.92	9
IWUE	0.58	0.638	10
Revenu net	6635	7925	19

La performance des systèmes irrigués n'est donc pas liée seulement aux contraintes posées par le milieu naturel et la technicité des agriculteurs, mais aussi, entre autres, à la disponibilité de ressources financières. Les agriculteurs ne disposant pas de ressources financières propres se trouvent dans des situations d'inefficience et ne peuvent les surmonter que par l'obtention de crédits.

6.3.2.3. Scénario 3 : Amélioration de l'accès à l'eau

L'accès à l'eau à l'échelle du périmètre peut être amélioré en assurant la mise en place des régulateurs de pression au niveau des vannes, un bon entretien de la station de pompage et l'amélioration du service de distribution de l'eau, assurés par le groupement de développement agricole (GDA). L'amélioration de l'accès à l'eau est une décision politique qui doit être justifiée par son impact positif sur l'ensemble des exploitations agricoles. La question de performance se pose donc à l'échelle du périmètre.

Les résultats de la typologie qui ont dégagé des classes, représentées par des exploitations types, représentatives de la diversité des choix de cultures et de techniques d'irrigation, ont été utilisés pour simuler ce scénario. Des modèles individuels ont été établis sur les exploitations types de chaque classe, puis agrégés vers le périmètre irrigué en considérant l'effectif de chaque classe comme coefficient de pondération. Les étapes de simulations sont :

Importance de l'accès à l'eau par rapport à l'efficience technique: le test de corrélation de Spearman (corrélation sur les rangs pour une distribution non normale) a montré que le poids de la relation entre l'accès à l'eau et l'ET est de 0.711 (p value<0.001). Il est donc possible de supposer que l'amélioration de l'accès à l'eau permettra d'absorber 70% de l'inefficience technique.

Calcul de la valeur de la production, le revenu net, TE et IWUE à l'échelle du périmètre : L'output a été calculé pour les exploitations type de chaque classe à la situation d'équilibre actuelle. L'effectif de chaque classe a permis de calculer ce dernier à l'échelle de la classe qui par agrégation, l'output a été calculé à l'échelle du périmètre. A partir de la situation d'équilibre actuelle, une simulation a été faite en supposant une absorption de 70% de l'inefficience technique. Les inputs sont les mêmes, les nouveaux outputs et le revenu net ont été recalculés. Le programme DEAP a permis de calculer la nouvelle IWUE caractéristique du scénario 3.

Les résultats de simulations ont montré que le scénario 3 permet une nette amélioration de l'efficience de l'utilisation de l'eau à l'échelle du périmètre (IWUE), passant de 0.595 à 0.828, soit un gain de 39%. Le revenu net peut augmenter de 42%. De même, une amélioration de 10% sur l'ET et de 11% sur la valeur de la production sont possibles grâce à ce scénario (Tableau 23)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tableau 23. Impact du scénario 3 sur le revenu net, l'TE et l'IWUE à l'échelle du périmètre

	Situation actuelle	Simulation scénario 3	gain (%)
Output (DT)	1 751 171	1 938 430	11
Volume d'eau (m³)	1 260 929	1 260 929	0
superficie	472	472	0
Charge variable (DT)	568 653	568 653	0
revenu net (DT)	449 945	637 205	42
TE	0,873	0,962	10
IWUE	0,595	0,828	39

Il est nécessaire de donner de l'importance à l'amélioration de la performance des petites exploitations agricoles de moins de 10 hectares, qui représentent en Tunisie 73% des exploitations agricoles (CEA, 2008). Contrairement aux grandes exploitations agricoles, qui permettent de rentabiliser les investissements grâce à des économies d'échelle et qui procèdent partiellement à la substitution de la main d'œuvre par des machines, ces exploitations familiales participent activement à la croissance économique, à la création d'emplois et au développement local, en optant souvent à des systèmes de production leur permettant de valoriser au mieux la force de travail familiale disponible. Sur ces exploitations, la consommation des ménages est plus ou moins satisfaite immédiatement.

Il est donc nécessaire d'agir sur les leviers de la performance globale des exploitations agricoles familiales qui permet de valoriser les ressources naturelles tout en cherchant à améliorer le revenu de l'agriculteur. Ceci permettra de diminuer la pauvreté en milieu rural et contribuera ainsi à réduire les vagues de l'exode rural. Actuellement, un pôle de pensée vise à réhabiliter l'agriculture familiale paysanne, partant du principe que l'exploitation familiale bénéficie d'avantages certains par rapport à l'entreprise classique, qui investit en agriculture en obéissant à la simple logique d'augmentation du profit (Sraïri, 2005).

6.4. Conclusion

Notre approche de l'analyse de la performance est globale, non réductionniste et ne consiste pas à ramener l'étude de la performance de l'exploitation agricole à de simples expérimentations en milieu contrôlé. Ce positionnement pour un regard croisé renvoie à des approches pluridisciplinaires pour mieux saisir la complexité des exploitations agricoles dans leur diversité. La démarche suivie dans ce travail nous a permis d'expliciter les déterminants de la performance des exploitations agricoles. Elle offre un cadre d'analyse intéressant, en s'appuyant sur un regard qui a la particularité de considérer l'exploitation agricole comme un tout en interaction avec son milieu. De plus, le recours à un outil simple et pertinent peut être mis en place et exploité par le gestionnaire de l'aménagement pour décrire les performances des systèmes irrigués. La finalité de cet outil est de faciliter l'identification des indicateurs et des facteurs les plus pertinents de la performance effective d'un système. D'où, la possibilité d'une réflexion raisonnée sur des scénarios d'amélioration à partir d'une situation d'équilibre réelle. Cette méthode d'évaluation a été orientée pour aborder spécifiquement deux principaux problèmes qui affectent les performances des systèmes irrigués : (i) la faible performance hydraulique liée aux pertes significatives d'eau et (ii) la faible valorisation des facteurs de production eau, terre et capital.

Les résultats ont montré que la classe d'exploitation, qui définit la culture pratiquée et les techniques d'irrigation utilisées, n'est pas déterminante pour la performance de l'exploitation. La pratique de l'irrigation localisée ne diffère pas de la pratique de l'irrigation de surface dans les conditions actuelles de production. La performance hydraulique n'est pas corrélée aux efficiences économiques et d'utilisation de l'eau, alors que l'accès à l'eau et la disponibilité de ressources financières sont les principaux déterminants de la performance des systèmes

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

irrigués sur ce périmètre. Ce sont donc les premiers leviers sur lesquels il faut agir en priorité en vue d'améliorer la performance globale à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation ainsi qu'à l'échelle du périmètre.

Le travail a été ensuite orienté vers la simulation de scénarios d'amélioration, définies à partir de ces leviers, et l'évaluation de leur impact sur l'exploitation et sur le périmètre irrigué. Les calculs d'impact ont permis de justifier la validité des mesures proposées par ces scénarios.

Ce travail constitue une contribution à la méthodologie d'évaluation de la performance globale des exploitations agricoles. La principale limitation de ce travail en terme méthodologique a été de ne pas disposer de données technico-économiques suffisantes pour appliquer la fonction duale pour la simulation de scénarios, qui évite le biais d'agrégation. Il serait intéressant d'élargir cette analyse sur plusieurs années, pour représenter plusieurs conditions climatiques associées. Un approfondissement sur le paquet technologique semble également pertinent.

Le facteur de production eau étant considéré comme un bien économique et pas comme une ressource rare et épuisable, les performances hydrauliques ne présentent pas suffisamment d'importance si le coût de l'eau d'irrigation est faible par rapport aux autres coûts de production.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Conclusion générales et perspectives

Les périmètres irrigués de la basse vallée de la Medjerda ont été implantés depuis les années 60 pour valoriser les ressources en eau et en sol, installer une nouvelle configuration sociale et économique en créant un marché du travail et contribuer à l'autosuffisance en production agricole. Les infrastructures mises en place n'ont pas atteint leur objectifs et un décalage entre les performances réelles et celles prévues persiste. Ces périmètres irrigués sont actuellement soumis à de fortes contraintes climatique, hydraulique, agronomique et sociale et présentent des situations spécifiques qui n'ont fait l'objet que d'un nombre limité d'études.

Pour une meilleure gestion de ces systèmes irrigués, et dans l'optique d'une amélioration de la performance hydraulique et économique, l'étude de la performance des systèmes irrigués dans une approche globale mérite d'être approfondie. Le présent travail de thèse a été centré sur l'étude des indicateurs de performance hydraulique, agronomique et économique ainsi que sur celle de leurs déterminants où différents facteurs interviennent dans le processus de production qui diffère d'une exploitation à l'autre. Il s'agit d'établir une méthodologie d'analyse multicritère des systèmes irrigués pour déterminer des leviers pertinents pour une amélioration globale de ces systèmes. Le contexte est marqué par une mauvaise gestion du réseau public d'irrigation ainsi que par la complexité des interactions des contraintes dans le processus de production et par la diversité des pratiques et des stratégies des agriculteurs.

Dans ce contexte nous avons mis en place des étapes complémentaires. D'abord, un diagnostic pour dégager les contraintes dictées par le réseau de distribution d'eau. Puis, les performances hydrauliques et économiques et leurs interactions ont été évaluées tout en introduisant d'autres facteurs intervenant dans le processus de production. Les conclusions porteront sur : (i) le diagnostic des exploitations agricoles et l'analyse de la demande en eau du périmètre en relation avec la capacité de l'offre du réseau de distribution; (ii) l'évaluation des performances hydrauliques et économiques en se basant sur des mesures hydrauliques *in situ* et des enquêtes technico-économiques détaillées; (iii) l'analyse des déterminants de la performance dans une approche globale pour proposer des leviers pertinents pour son amélioration et de (iv) simuler des scénarios d'amélioration et enfin (v) présenter la validité et les limites de l'approche et (vi) proposer des perspectives de recherche.

L'offre du réseau d'irrigation constitue une contrainte à la performance des exploitations agricoles

A l'inverse des modèles de cultures qui supposent que les agriculteurs adoptent les systèmes de culture planifiés, nous avons utilisé les résultats d'une typologie des exploitations pour calculer le besoin en eau d'irrigation des cultures installées. L'analyse de ce besoin en relation avec la capacité du réseau de distribution nous a permit de mettre en évidence les contraintes dictées par le réseau. En ultime conclusion pour cette analyse, nous notons que :

Une orientation vers l'intensification des cultures et de l'irrigation a été observée, ce qui ne concorde pas avec la capacité maximale de l'offre du réseau. Ce qui a fait que le réseau ne peut fournir que 65% des besoins en eau d'irrigation des cultures installées durant le mois de pointe (juillet).

Les principales causes du faible taux de satisfaction des besoins en eau des cultures sont les pratiques individuelles qualifiées d'inefficientes à savoir : l'utilisation d'un faible débit sur le secteur de distribution gravitaire est à l'origine de grande pertes; le manque de maitrise des techniques d'irrigation localisées ne valorise pas l'investissement mis pour son acquisition, mais aussi la stratégie d'extension des parcelles et des vannes accentue le problème de déficit hydrique; s'ajoute à ces pratiques la mauvaise gestion de distribution de l'eau par le groupement de développement agricole qui gère la distribution de l'eau sur le périmètre.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Ces résultats constituaient un point de départ pour comprendre les contraintes à l'amélioration de la performance des exploitations agricoles du périmètre.

Evaluation des performances hydrauliques et économiques des systèmes irrigués

Cette évaluation s'est basée sur des mesures techniques *in situ* et des enquêtes technico-économiques auprès des agriculteurs. L'évaluation de ces performances montre que le système de production, dans ces conditions, est confronté à un certain nombre de contraintes qui remettent en question la valorisation des facteurs de production notamment l'eau. Ces contraintes sont essentiellement liées à la gestion de distribution de l'eau, à l'état des équipements et aussi aux aspects socio-économiques. Les principales conclusions tirées de ce travail d'évaluation sont les suivantes :

Les mesures hydrauliques ont montré que les apports d'eau se font avec de faibles doses, d'où de bonne efficience d'application. En contre partie, l'efficience de distribution vers la parcelle des systèmes d'irrigation par aspersion et en localisé sont médiocres sur la plupart des parcelles suivies à cause de la vétusté des équipements. Par contre, en irrigation de surface, pratiquée surtout avec l'olivier et le fourrage, la majorité des irrigants ont montré un savoir faire en pratiquant les irrigations avec de bonnes efficiences de distribution vers la parcelle.

Les contraintes de faible disponibilité en eau sont à l'origine de pertes d'eau durant le distribution vers la parcelle sur le secteur de distribution gravitaire; Un faible débit favorise l'infiltration sur le tertiaire. Sur le secteur de distribution sous pression, la chute de pression est à l'origine du mauvais fonctionnement des systèmes d'eau.

L'analyse technico-économique a montré que l'élevage et la culture de tomate valorisent au mieux le facteur de production terre. Par contre, le facteur capital -charge variable- est valorisé au mieux en pratiquant le blé et l'olivier. Etant donné que les agriculteurs ont des difficultés d'investissement, ces résultats répondent à l'interrogation relative à l'extension des superficies en blé et olivier sur un périmètre irrigué destiné au maraichage, les fruits et le fourrage.

L'efficience économique représentée par le concept de l'efficience technique, qui traduit le degré d'efficience d'utilisation de l'ensemble des facteurs de production, reste satisfaisant par rapport à l'efficience de l'utilisation de l'eau qui est plus faible surtout dans le cas de l'olivier et du blé.

Il existe un potentiel significatif d'amélioration de l'efficience de l'utilisation de l'eau en gérant mieux les événements d'irrigation étant donné que les rendements des cultures installées restent proches des rendements standards.

Une approche globale d'analyse de la performance des systèmes irrigués

A l'inverse d'une démarche purement technique, applicables à tout systèmes irrigués, ou purement économique, qui se réfèrerait à des normes, notre analyse de la performance des systèmes irrigués vise une identification des facteurs déterminants de la performance de ces systèmes, dans une approche globale. L'emploi d'une approche à regard croisé entre différentes disciplines avait pour finalité l'identification des contraintes effectives et leur interaction mutuelle. Un changement de posture des approches normatives classiques est nécessaire pour réussir les plans de développement et aussi la mise en œuvre d'interventions adaptées. Cette analyse nous a permit de dégager des leviers sur lesquels il faut agir pour des mesures d'amélioration. En ultime conclusion pour cette analyse, nous notons que :

A l'échelle de la parcelle, l'efficience économique n'est pas corrélée aux indicateurs de performance hydraulique; des parcelles caractérisées par une efficience hydraulique médiocre entrainant des pertes d'eau significatives sont économiquement efficiente. Une divergence

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

existe donc entre le souci de la communauté -la valorisation de la ressource en eau- et le profit économique, souci majeur de l'agriculteur.

A l'échelle de l'exploitation, l'accès à l'eau au moment opportun est une contrainte plus sévère que la disponibilité de l'eau en volume. L'accès à l'eau et à l'investissement sont les deux premiers leviers à mettre en action pour une amélioration de la performance globale.

Ce travail qui tente de spécifier *in fine* les priorités d'intervention et d'accompagnement des agriculteurs a mis en évidence que la valorisation des ressources en eau et la performance des systèmes irrigués sont des concepts complexes; Au-delà de la simple dimension technique de la mobilisation et de l'application de l'eau d'irrigation, les aspects socio-économiques interagissent avec les aspects techniques dans le processus de production. La politique entreprise par les autorités publiques dans l'économie et la valorisation des sols et des ressources en eau, doit aller au-delà des solutions techniques et s'imprégner des conditions réelles des agriculteurs. Elle doit en outre respecter la dimension socio-économique des systèmes irrigués. En effet, la situation économique actuelle des exploitations est caractérisée par une stratégie de survie. En effet, le revenu net de l'exploitation ne permet pas l'acquisition d'équipement d'irrigation pour faire face aux pertes d'eau durant sa distribution vers la parcelle. Dans ce cas la seule évaluation des indicateurs hydraulique et les incitations à les améliorer n'ont guère de chance de contribuer à l'amélioration du fonctionnement des périmètres irrigués. Par contre, agir sur les leviers effectifs de la performance globale permet d'améliorer de concert les performances économiques et aussi les performances hydrauliques.

Scénarios d'amélioration

Différents scénarios peuvent être définis suivant l'objectif visé. Les simulations dont les résultats représentent une justification de leur validité, nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Des mesures d'accompagnement de l'état sous forme d'octroie de subventions pour l'acquisition de nouveaux équipement permet d'économiser 26% du volume d'eau d'irrigation actuellement utilisée. Par contre, ces mesures n'ont pas d'impact direct sur les indicateurs économiques vue que le coût de l'eau d'irrigation est faible par rapport aux autres facteurs de production. L'impact économique peut être perceptible plus tard étant donné que cette économie d'eau favorise d'intensification de l'irrigation et des cultures et par suite une amélioration du revenu de l'agriculteur.

L'amélioration de l'accès à l'investissement permet un gain moyen de 9% sur l'efficience économique, de 10% sur l'efficience de l'utilisation de l'eau et de 19% sur le revenu net de l'exploitation. L'amélioration de l'accès à l'eau permet un gain moyen, à l'échelle du périmètre, de 10% sur l'efficience économique, de 39% sur l'efficience de l'utilisation de l'eau et de 42% sur le revenu net.

En conclusion, pour identifier les facteurs pertinents pour la performance d'un système irrigué, "une analyse multicritère" de la performance est nécessaire. Pour entreprendre un plan d'action, une simulation de scénarios en se basant sur les leviers dégagés s'impose en prenant en compte les spécificités locales et le contexte social pour en adapter les changements techniques projetés.

Validités et limites de l'approche

La principale limitation de notre démarche d'analyse est qu'elle est basée sur seulement l'échantillon enquêté. Bien que l'échantillon ait été choisi sur la base des résultats de la typologie, le calcul de l'efficience économique s'est fondé sur les exploitations les plus efficientes de l'échantillon. Toute fois il serait pertinent aussi à se référer par rapport à l'optimum, ce qui relève du concept de l'efficacité. Il convient aussi de s'interroger sur la

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

généricité de notre démarche et sa portée en dehors du cadre d'analyse du périmètre support de ce travail.

Perspectives

Les investigations menées dans ce travail de recherche constituent une première contribution à l'évaluation de la performance des systèmes irrigués selon une approche globale. Elles devront être complétées par des actions de recherche tant sur le plan expérimental que sur la démarche méthodologique. Parmi ces actions nous pouvons citer les suivantes :

- l'évaluation des performances des exploitations a été établie sur une seule année et leur dynamique d'évolution s'avère de ce fait difficilement perceptible; Une analyse similaire sur plusieurs années permettra de valider les tendances observées et de fournir des éléments pour l'étude des dynamiques d'évolution.
- pour plus de pertinence, il faudrait multiplier les approches expérimentales sur différentes zones et ce, pour une connaissance plus affinée sur les interactions entre le contexte hydraulique, agronomique et socio-économique.
- il serait intéressant, en plus de l'efficience, d'analyser l'efficacité des exploitations agricoles qui se réfèrent à des résultats optimaux.
- pour une meilleure modélisation économique, la disposition d'un échantillon plus riche en taille et en détails serait importante pour éviter le biais de l'agrégation et de la représentativité.
- l'énoncé d'indicateurs synthétiques et/ou générique serait important pour évaluer l'impact de différents changements sur l'évolution des performances.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Références bibliographiques

Abernethy CL. 1990. Indicators and criteria of the performance of irrigation systems. Paper presented at the FAO Regional Workshop on Improved Irrigation System Performance for Sustainable Agriculture, Bangkok, Thailand, 22–26 October.

Akbari, M., Toomanian, N., Droogers, P., Bastiaanssen, W., Gieske, A., 2007. Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery. Agricultural Water Management, 88: 99-109

Al Atiri, R. (2005). Analyse des politiques hydrauliques. Cas de la Tunisie. In Bachta M.S. (ed) Les instruments économiques et la modernisation des périmètres irrigués, 21-22 novembre 2005, Sousse, Tunisie, 22 p.

Albouchi, L., Bachta, M.S., Jacquet, F., 2005. Estimation et décomposition de l'efficacité économique des zones irriguées pour mieux gérer les inefficacités existantes. Paper presented at: Séminaire Euro Mé diterrané en: Les Instruments Economiques et la Modernisation des Périmètres Irrigués, Sousse, TUN, 21–22 November 2005.

Alene, A.D., Zeller, M., 2005. Technology adoption and farmer efficiency in multiple crops production in eastern Ethiopia: a comparison of parametric and nonparametric distance functions. Agric. Econ. Rev. 6, 5–17.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computer crop water requirements). FAO Irrig. and Drain. Paper No. 56, Food and Agricultural Organization of the United Nations,Rome.

Allen, R.G., Willardson, L.S., Fredriksen, H.D., 1997. Water use definitions and their use for assessing the impacts of water conservation. In: deJager, J.M., Vermes, L.P., Ragab , R. (Eds.), Proceedings of the ICID Workshop ''Sustainable Irrigation in Areas of Water Scarcity and Drought'', Oxford, England, pp. 72–80.

Amara, N., Robert, R., (2000). Mesure de l'efficacité technique : Revue de la littérature, Série Recherche SR.00.07, Département d'économie agroalimentaire et des sciences de la consommation, Université Laval, Québec.

Banker, R.D., Charnes, A., Cooper, W.W.,1984. Some Model for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. Management Science. 30, 1078-1092. Cited in (Frija, 2009).

Beitone, A., Cazorla, A., Dollo, C., Drai, A.M., 2008. Dictionnaire des Sciences économiques, Armand Colin, Paris.

Belder, P., Spiertz, J.H.J., Bouman, B.A.M., Lu, G., Tuong, T.P., 2004. Nitrogen economy and water productivity of lowland rice under water-saving irrigation. Field Crops Res. 93 (2–3), 169–185.

Bergez, J.E., Deumier, J.M., Lacroix, B., Leroy, P., Wallach, D., 2002. Improving irrigation schedules by using a biophysical and a decisional model. European Journal of Agronomy 16(2): 123–135.

Bessembinder, J.J.E., Leffelaar, P.A., Dhindwal, A.S., Ponsioen, T.C., 2005. Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. Agriculture Water Management 73 (2), 113–130.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Blancard, S., Boussemart, J.P., 2006. Productivité agricole et rattrapage technologique : le cas des exploitations de grandes cultures du Nord-Pas-de-Calais. Cahiers d'économie et sociologie rurales, 80, 6-28.

Bluemling, B., Yang,H., Pahl-Wostl, C., 2007. Making water productivity operational—A concept of agricultural water productivity exemplified at a wheat–maize cropping pattern in the North China plain. Agriculture Water Management 71, 11-23.

Bogan, C.E., English, M.J., 1994. Benchmarking for Best Practices. McGraw-Hill: Maidenhead, UK.

Bojanic, A.N., Caudil, S.B., Ford, J.M., 1998. Small sample properties of ML, COLS and DEA estimators of frontier models in the presence of heteroscedasticity. European Journal of Operational Research. 108, 140-148

Bos, M. G., 1997. Performance indicators for irrigation and drainage. Irrigation and Drainage System 11(2), 119-137.

Bottrall, A.F., 1981. Comparative study of the management and organisation of irrigation projects. World Bank Staff Working Paper No. 458, World Bank, Washington, DC.

Bravo-Ureta, B.E. et Pinheiro, A.E., 1997. Technical, Economic and Allocative Efficiency in Peasant Farming: Evidence from the Dominican Republic. Cahiers d'économie et sociologie rurale, 44, 29-59.

Bravo-Ureta, B. E., Rieger, L., 1990. "Alternative Production Frontier Methodologies and Dairy Farm Efficiency." Journal of Agricultural Economics 41, no. 2: 215–226.

Brossier, J., 2007. Apport des théories sur l'exploitation agricole dans une perspective de gestion. Dans Exploitation agricoles familiales en Afrique de l'Ouest et du Centre, Quae, 87-101.

Burt, C.M., Styles, S.W., 2004. Conceptualizing irrigation project modernization through benchmarking and the rapid appraisal process. Irrig. and Drain. 53, 145–154.

Burt, C.M., 2000. Selection of irrigation methods for agriculture. On-Farm Irrigation Committee. ASCE, 125 p.

Burt, C.M., Styles, S.W., 1999. Modern Water Control and Management Practices: Impact on Performance.Water Report 19, FAO/IPTRID/World Bank. FAO: Rome.

Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Howell, L.T., Eisenhauer, D., Bleisner, R. 1997. Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity. J Irrigation and Drainage Engineering 123(6): 423–442.

Byerlee, D., Collinson, M., Perrin, R., Winkelmann, D., Biggs, S., Moscardi, E., Martinez, J.C., Harrington, L., Benjamin, A., 1980. Planning technologies appropriate to farmers, Concepts and procedures. Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo: Mexico.

Camp, R.C., 1989. Benchmarking. American Society for Quality Control: Milwaukee, Wis., USA.

Cantero-Martinez et al., 2003

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Casanova, D., Goudriaan, J., Bouma, J., Epema, G.F., 1999. Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice. Geoderma 91: 191-216.

CEA, Commission Economique pour l'Afrique, 2008. Les petites et moyennes entreprises acteurs du développement durable; [on line] URL: http://uneca-an.org/cie2008/francais/note%20pme.pdf

Charnes, A., Cooper, W.W. et Rhodes, E., 1978.Measuring the Efficiency of Decision making Units. European Journal of Operations Research. 2, 429-444. Cité par (Frija, 2009).

Christiansen, J.E., 1942. Irrigation by sprinkling. California Agric. Exp. Sta. Bull. 670. University of California, Berkeley. Cité dans (Pereira, 1999)

Clemmens, A.J., Dedrick, A.R., Clyma, W., Ware, R.E., 2000. On-farm system performance inthe Maricopa-Stanfield Irrigation and Drainage District area. Irrigation and Drainage Systems 14: 93-120.

Coelli, T., Rahman, S., Thirtle, C., 2002. Technical, allocative, cost and scale efficiencies in Bangladesh rice cultivation: a non-parametric approach. J. Agric. Econ. 53.(3), 607–627.

Coelli, T.J., Rao, D.S., Battese, G.E., 1998, An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis, Kluwer Academic Publishers, Boston.

Coelli, T. J., 1996. A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (computer) program. Centre for Efficiency and Productivity Analysis Working (CEPA) Paper 08/96, Department of Econometrics, University of New England, Armidale, Australia.

Condon, A.G., Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Farquhar, G.D., 2004. Breeding for high water-use efficiency. J. Exp. Bot. 55, 2447–2460.

Dagdelen, N., Yılmaz, E., Sezgin, F., Gürbüz, T., 2006. Water-yield relation and water use efficiency of cotton (Gossypium hirsutum L.) and second crop corn (Zea mays L.) in western Turkey. Agric. Water Manage. 82, 63–85.

Debreu, G., 1951. Measures the inefficiency of the allocation of resources in an economy by calculating how much less resources could attain the same level of satisfaction to the consumers. Cité par (Frija, 2009).

Dechmi, F., Playan, E., Faci, J.M., Tejero, M., 2003. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain I. Characterisation and water use assessment. Agricultural Water Management 61, 75–92.

DGGTH, (2001). Ministère de l'Agriculture et des Ressources en Eau, Plan Guide de Gestion des Ressources en Eau – Rapport de synthèse

DGPA, 2008/2009. Direction Générale de Production Agricole. Ministère de l'agriculture-Tunisie

Dhehibi, B., Lachaal, L., Elloumi, M., Messaoud, A., 2007. Measuring irrigation water use efficiency using stochastic production frontier: an application on citrus producing farms in Tunisia. J. Afr. econ 1 (2), 99–114.

Direction Générale des Etudes des Travaux Hydrauliques (DGETH), Ministère de l'agriculture, 1993. Economie d'eau 2000-rapport de stratégie de gestion d'eau. 152 p + annexes

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Doorenbos and Kassam (1979) cited in Zoebl, D., 2006. Is water productivity a useful concept in agricultural water management? Agricultural Water Management. 84, 265–273.

Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179 p. cited in Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computer crop water requirements). FAO Irrig. and Drain. Paper No. 56, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.

Droogers, P., Malik, R.S., Kroes, J.G., Bastiaanssen, W.G.M., Dam, J.C. van, 2003. Future water management in Sirsa district: options to improve water productivity. in: Dam, J.C. van, Malik, R.S. (Eds.) Water productivity of irrigated crops in Sirsa District, India, Wageningen UR and CCS Haryana Agricultural University. WATRPRO final report: pp. 135–156.

FAO, 2002. Crops and drops: Making the best use of water for agriculture. Rome, Italy, 22 p.

Farrell, M.J., 1957. The measurement of productive efficiency. Journal of the Royal Statistical Society, Series A, 120 (3) : 253-290. Cited in Frija, A., Chebil, A., Speelman, S., Buysse, J., Huylenbroeck, G. V., 2009. Water use and technical efficiencies in horticultural greenhouses in Tunisia. Agricultural Water Management. 96, 1509–1516.

Frija, A., Chebil, A., Speelman, S., Buysse, J., Huylenbroeck, G. V., 2009. Water use and technical efficiencies in horticultural greenhouses in Tunisia. Agricultural Water Management. 96, 1509–1516.

Gamache, R., 2005. La productivité : définition et enjeux. Research Paper Series, 117, Statistique Canada, 36p.

Ghazouani, W., Marlet, S. Mekki, I., Vidal, A., 2009. Farmer's perceptions and engineering approach in the modernazition of a community-managed irrigation scheme. A case study from an oasis of the Nefzawa (South of Tunisia). Irrigation and Drainage. 58 (3), 285-296

Goodstein, L., Nolan, T., Pfeiffer, J.W., 1993. Applied Strategic Planning: How to Develop a Plan that Really Works. McGraw-Hill: New York; 379.

Gopinath, M., Kennedy, M.,P.L., 2000. Agricultural trade and productivity growth: a state level analysis. American Journal of Agricultural Economics. 82 (5): 1213- 1218.

Gorantiwar, S.D., Smout, I.K., 2005. Performance assessment of irrigation water management of heterogeneous irrigation schemes: 1. A framework for evaluation. Irrigation and Drainage Systems. 19, 1-36.

Guerrien, B., 2002. « Dictionnaire d'analyse économique, microéconomie, macroéconomie, théorie des jeux », La Découverte, Paris, 2002, 568 p.

Hamdi, A., Ragab, R., Scarascia-Mugnozza, E., 2003. Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. Irrig. and Drain. 52, 3–20

Hanafi, S., Mailhol. J.C., Poussin, J.C., Zairi, A., 2011. Estimating water demand at irrigation scheme scale using several levels of knowledge – application in northern Tunisia. Irrigation and drainage. DOI: 10.1002/ird.652

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Heermann, D.F, Wallender, W.W., Bos, M.G., 1990. Management of Farm Irrigation Systems. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI. p 125-149 cité dans (Hoffman, 1993)

Heinemann, A.B., Hoogenboom, G., de Faria, R.T., 2002. Determination of spatial water requirements at county and regional levels using crop models and GIS. An example for the Sate of Parana, Brazil. Agriculture Water Management 52: 177–196.

Hillel, D. (2000). Salinity Management for Sustainable Irrigation. Integrating Science, Environment and Economics. Environmentally and socially sustainable development. The World Bank, Washington, 102 p.

Horst, M.G., Shamutalov, S.S., Pereira L.S., Gonçalves, J.M., 2005. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin. Agricultural Water Management. 77, 210-231.

Imache, A., 2008. Construction de la demande en eau agricole au niveau régional en intégrant le comportement des agriculteurs. PhD. De l'Agro Paris Tech, 229 p.

International Commission on Irrigation and Drainage (ICID). 1996. Proceedings of the ICID/FAO Workshop on Irrigation Scheduling. FAO irrigation and drainage paper 8. FAO, Rome, Italy.

Jamasb, T., Pollitt, M., 2000. Benchmarking and regulation: international electricity experience. Utilities Policy 9(3): 107–130.

Juana, L., Rodriguez-Sinobas L., Sànchez R., Losada A., 2007. Evaluation of drip irrigation: Selection of emitters and hydraulic characterization of trapezoidal units. Agricultural Water Management. 90, 13 - 26.

Kaci, M., 2006. Comprendre la productivité : un précis. La Revue canadienne de productivité, n° 15-206-XIF au catalogue, Statistique Canada, Ottawa.

Kar, G., Kumar, A., Martha, M., 2007. Water use efficiency and crop coefficients of dry season oilseed crops. Agricultural water management. 87, 73-82.

Katerji, N., Mastrorilli, M., Rana, G., 2008. Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: review and analysis. Eur. J. Agron. 28, 493–507.

Khaledian, M.R., Mailhol, J.C., Ruelle, P., Rosique, P., 2009. Adapting Pilote model for water and yield management under direct seeding system: The case of corn and durum wheat in Mediterranean context. Agricultural Water Management 96(5): 757–770.

Khan, S., Hanjra, M.A., 2008. Sustainable land and water management policies and practices: a pathway to environmental sustainability in large irrigation systems. Land Degradation & Development 19(5): 469-487.

Kijne, J.W., Prathapar, S.A., Wopereis, M.C.S., Sahrawat, K.L.,1998. How to manage salinity in irrigated lands. A selective review with particular reference to irrigation in developing countries. System-Wide Initiative for Water Management, Paper 2, IWMI, Combo, Sri Lanka, 33 p.

Kitchen, N.R., Drummond, S.T., Lund, E.D., Sudduth K.A., Buchleiter G.W., 2003. Soil Electrical Conductivity and Topography Related to Yield for Three Contrasting. Soil-Crop Systems. Agronomy journal 95: 483-495.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Kloezen, W.H., Garcés-Restrepo, C., 1998. Assessing irrigation performance with comparative indicators: The case of the Alto Rio Lerma Irrigation District, Mexico. Research Report 22. International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka, 35p.

Kobou, G., Moungou, S. et Ngoa Tabi, H. 2009. L'efficacité du financement des micro et petites entreprises dans la lutte contre la pauvreté au Cameroun, Colloque International, la vulnérabilité des TPE et des PME dans un environnement mondialisé.

Koopmans, T. C., 1951. An Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities. In T.C. Koopmans, (ed.), Activity Analysis of Production and Allocation. Cowles Commission for Research in Economics. Monograph n°13. New York:

Kotb, T.H.S., Watanabe, T., Ogino, Y., Nakagiri, T., 2000. Performance assessment framework for irrigation system characterization and comparative evaluation among regional units - Case study: Egypt's irrigated agricultures -. Journal of arid land studies 10(1): 59-74.;

Kuper, M., Bouarfa, S., Errahj , M., Fayesse, N., Hammani A., Hartani T., Marlet S., Zaïri A., Bahri A., Debbarh A., Garin P., Jamin J.Y. & Vincent B., 2009. A crop needs more than a drop: towards a new praxis in irrigation management in North Africa. Irrigation and Drainage. 58: S231-S239.

Kuper , M., Habib, Z., 2002. Containing salinity through irrigation management: the case of the Fordwah area in Pakistan. In Marlet S. et Ruelle P. (Eds) « Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation » Actes de l'atelier du PCSI, 28-29 mai 2002,Montpellier, France CEMAGREF, CIRAD, IRD.

Le Grusse, P.H., Mailhol, J.C., Bouaziz, A., Zairi, A., Raki, M., Chabaka, M., Djebara, M., Ruelle, P., 2009. Indicators and framework for analysing the technical and economic performance of irrigation systems at farm level. Irrigation and drainage. 58 (3), 25-35

Leca, A., Valiron, F., Rolland, L., Cintas, J., Tron, M., 1956. La mise en valeur de la vallée de la Medjerda. Royaume de Tunis, 122p.

Levine, G., 1982. Relative Water Supply: An Explanatory Variable for Irrigation Systems. Technical Report No. 6. Cornell University, Ithaca, NY, USA.

Lorite I.J., Mateos L., Orgaz F., Fereres E., 2007. Assessing deficit irrigation strategies at the level of an irrigation district. Agricultural Water Management 91: 51-60.

Lorite, I.J., L. Mateos, L., Fereres, E., 2004. Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment. II. Variability among crops and farmers. Irrig Sci. 23, 85–92

Mailhol, J.C., Zairi; A., Slatni, A., Ben Nouma, B., El Amani, H., 2004. Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia. Agricultural Water Management 70: 19–37.

Mailhol, J.C, Ayorinde, A.A., Ruelle, P., 1997. Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. Agric Water Manag 35: 167–182.

Makin, I.W., Goldsmith, H., Skutsch, J.D. , 1990. Ongoing Performance Assessment—A Case Study of Kraseio Project, Thailand. Hydraulics Research, Report OD/P 96: Wellingford, UK.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Malano, H., Burton, M., Makin, I., 2004. Benchmarking performance in the irrigation and drainage sector: a tool for change. Irrigation and Drainage. 53: 119–133

Malano, H., Burton, M., 2001. Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. IPTRID Secretariat, FAO, Rome, Italy, 29 p.

Maton L, Leenhardt D, Goulard M, Bergez JE. 2005. Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems. Agricultural Systems 86: 293–311.

Merriam, J.L., Keller, J., 1978. Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management. Dept. Agri. Irrig. Eng, Utah St. University, Logan. Cited in (Pereira et al., 1999)

Mignolet C, Benoît M, Bornerand C. 2001. Différenciation du bassin de la Seine selon les dynamiques des systèmes de production agricoles depuis les années 70. Cahiers Agricultures 10(6): 377–387.

Molden, D.J., Sakthivadivel, R., 1999. Water accounting to assess use and productivity of water. Water Res Devel. 15, 55–71.

Molden, D.J., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., de Fraiture, C., Kloezen, W., 1998. Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems. Research Report 20. International Water Management Institute: Colombo.

Molden, D.J., Gates, T.K., 1990. Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 116(6): 804–823.

Murray-Rust, D.H., Snellen, W.B., 1993. Irrigation System Performance Assessment and Diagnosis. Joint IIMI/ILRI/IHEE Publication. International Irrigation Management Institute: Colombo, Sri Lanka.

Nodjitidjé, D., 2009. Efficacité technique, productivité et compétitivité des principaux pays producteurs de coton, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans.

Nyemeck, B.J., 2004. Analyse des performances productives des exploitations agricoles de la région du centre Cameroun.

Oad, R., Mc Cornick, P.G., 1989. Methodology for assessing the performance of irrigated agriculture. ICID Bulletin 38(1), International Commission on Irrigation and Drainage: New Delhi, India; 42–53.

Oktem, A., 2008. Effects of deficit irrigation on some yield characteristics of sweet corn. Bangladesh Journal of Botany 37(2): 127-131.

Okuyama, L.A., Federizzi, L.C., Barbosa Neto, J.F., 2005. Grain Yield Stability of Wheat Genotypes under Irrigated and Non-Irrigated Conditions. Brazilian Archives of Biology and Technology 48(5): 697-704.

Ouvry, F., Marlet, S., 1999. Suivi de l'irrigation et du drainage. Etude des régles de gestion de l'eau et bilans hydro-salins à l'Office du Niger (cas de la zone de Niono, Mali). Travaux et études, nr. 8, PSI-Mali, Niono, Mali.

Pereira, L.S., Cordery, I., Iacovides, I., 2011. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. Agric. Water Manage. (2011), doi:10.1016/j.agwat.2011.08.022

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Pereira, L.S., Goncalves, J.M., Dong, B., Mao Z., Fang, S.X., 2007. Assessing basin irrigation and scheduling strategies for saving irrigation water and controlling salinity in the upper Yellow River Basin, China. Agricultural Water Management 93: 109-122.

Pereira, L.S., Oweis, T., Zairi, A., 2002. Irrigation management under water scarcity. Agricultural Water Management. 57, 175–206.

Pereira, L.S. (1999). Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. Agricultural Water Management 40: 153-169.

Perry, C.J., 1996. Quantification and measurement of a minimum set of indicators of the performance of irrigation systems. International Irrigation Management Institute, Colombo, mimeo.

Piot-Lepetit, P. et Rainelli, P., 1996. Détermination des marges de manoeuvre des élevages à partir de la mesure des inefficacités, INRA Unité d'Economie et Sociologie Rurales. politique et de l'impôt, Flammarion, Paris, 508 p.

Poussin, J.C., Imache, A., Beji, R., Le Grusse, P., Benmihoub, A., 2008. Exploring regional irrigation water demand using typologies of farms and production units: An example from Tunisia. Agricultural Water Management 95(8): 973–983.

Prathapar, S.A., Meyer, W.S., Madden, J.C., Alociljà, E., 1997. SWAGMAN Options: A Hierarchical Multicriteria Framework to Identify Profitable Land Uses that Minimize Water Table Rise and Salinization. Applied Mathematics and Computation 83 (2-3): 217-240.

Projet GCP/RAF/355/FRA, 2004. Principes agronomiques, hydrauliques, organisationnels et financiers d'amélioration des performances des périmètres irrigués en Afrique de l'Ouest. Rapport technique final. [on line] URL: ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/y5257f/y5257f00.pdf)

Pulido-Calvo, I., Carlos Gutiérrez-Estrada, J., 2009. Improved irrigation water demand forecasting using a soft-computing hybrid model. Biosystems Engineering 102(2): 202–218.

Rao, P.S., 1993. Review of Selected Literature on Indicators of Irrigation Performance. IIMI Research Paper No. 13. International Irrigation Management Institute: Colombo.

Rodriguez Diaz, J.A., Camacho, P.E., Lopez Luque, R., 2004. Application of data envelopment analysis to studies of irrigation efficiency in Analusia. J. Irrig. Drain. Eng. 130, 175–183.

Romain, R., Lambert, R., 1995. Efficacité technique et coûts de production dans les secteurs laitiers du Québec et de l'Ontario, Canadian Journal of Agricultural Economics, 43, 37-35.

Ruelle, P., Mailhol, J.C., Molle, B., 2005. Systèmes et stratégies d'irrigation pour une agriculture durable. Académie d'Agriculture de France. Colloque du 19 mai 2005 « IRRIGATION ET DÉVELOPPEMENT DURABLE ».

Sabatier, J.L., Ruf, T., Le Goulven, P. 1991. Dynamiques des systèmes agraires irrigués anciens: représentations synchroniques et diachroniques. L'exemple d'Urcuqui en Equateur. Les Cahiers de le Recherche Développement 29: 30-43.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Sakthivadivel, R, de Fraiture, C., Modeln, D.J., Perry, C., Kloezen, W., 1999. Indicators of land and water productivity in irrigated agriculture. International Journal of Water Resources Development 15 (1/2): 161–179.

Sarma, P.B.S., Rao, V.V., 1997. Evaluation of an irrigation water management scheme - a case study. Agricultural Water Management 32: 181-195.

SCET-TUNISIE et HYDROPLAN, 2002. Projet de modernisation des périmètres publics irrigués de la Basse Vallée de la Medjerda. Phase I : Analyse de la situation actuelle.

Sghaier, M., 1995. Tarification et allocation optimale de l'eau d'irrigation dans les systèmes de production de la région oasienne de Nefzaoua (Sud de la Tunisie). Thèse agronomie, Univ. Gent Belgique, 1995 : 235 p.

Singh, R., Dam , J.C.V., Feddes, R.A., 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. Agricultural Water Management 82: 253-278.

Sinuany-Stern, Z., Mehrez, A., Hadad, Y., 2000. An AHP/DEA methodology for ranking decision making units. International Transactions in Operational Research. 7(2), 109–124.

Slatni, A., Zayani, K., Zairi, A., Yacoubi, S. Salvador, R., Playan, E., 2011. Assessing alternate furrow strategies for potato at the Cherfech irrigation district of Tunisia. Biosystems Engineering, 108 (2), 154-163.

Small, LE, Svendsen, M., 1992. A framework for assessing irrigation performance. IFPRI Working Papers on Irrigation Performance No. 1, International Food Policy Research Institute, Washington, DC, August.

Smedema, L.K., Abdel Dayem, S.M., Vlotman, W.F., Abdel Aziz, A., van Leeuwen, H., 1996. Performance assessment of land Drainage Systems. Keynote address for Performance Assessment Workshop, ICID, Cairo, Egypt, 15– 22 Sept. 14 pp.

Speelman, S., D'Haese, M., Buysse, J., D'Haese, L., 2008. A measure for the efficiency of water use and its determinants, study at small-scale irrigation schemes in North-West Province, South Africa. Agric. Syst. 98 (1), 31–39.

Sraïri, M.T., 2005. Ingénierie agronomique et développement des exploitations familiales agricoles dans les pays du Sud : réflexions à partir du cas marocain. Cahiers d'Agricultures 14 (5): 485-491

Thanassoulis, E., 2000. The use of data envelopment analysis in the regulation of UK water utilities: water distribution. European Journal of Operational Research. 126, 436–453.

Thiam, A., Bravo-Ureta, B.E., Rivas, T.E., 2001. Technical Efficiency in Developing Country Agriculture a Meta-analysis, Agricultural Economics 25, 235-243.

Tongzon J., 2001. Efficiency measurement of selected Australian and other international ports using data envelopment analysis. Journal of Transportation Research Part A: Policy and Practice. 35(2), 113–128.

Vandersypen, K., Bengaly, K., Keita. A.C.T., Sidibe, S., Raes. D., Jamin, J.Y., 2006. Irrigation performance at tertiary level in the rice schemes of the Office du Niger (Mali): Adequate water delivery through over-supply. Agricultural water management: 83, 144-152.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Vincent, B., Vlotman, W.F., Zimmer, D., 2002. Performance assessment and potential indicators for drainage systems. ICID, New Delhi, Draft Publication ICIDWorking Group on Drainage. 77 pp. (www.icid.org/workbodies, then find the site of theWorking Group on Drainage, WGDRG).

Wadud, A., White, B., 2000. Farm household efficiency in Bangladesh: a comparison of stochastic frontier and DEA methods. Appl. Econ. 32, 1665–1673.

Warrick, A.W., Hart, W.E., Yitayew, M., 1989. Calculation of distribution and efficiency for nonuniform irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 115 (4): 674-686

Wild R., 1999. Production and Operations Management, 5th edn. Cassell: London.

World Bank, 2008. World Development Report 2008, Agriculture for Development, Washington, D.C.

Yacoubi, S., Zairi, A., Oueslati, T., Slatni, A., Amami, H., Ajmi, T., Ben Nouna, B., 2004. Influence des performances de l'irrigation par aspersion et du pilotage de l'irrigation et impact sur le rendement de la pomme de terre. Proceedings of Modernisation de l'agriculture irriguée seminar, INCOWADEMED project. Rabat, Morocco. URL: http://www.wademed.net/Articles/

Yacoubi, S., Zayani, K., Zapata, N., Zairi, A., Slatni, A., Salvador, R., Palayan, E., 2010. Day and night time sprinkler irrigated tomato: irrigation performance and crop yield. Biosystems Engineering. 107 (1), 25-35.

Zairi, A., El Amami, H., Slatni, A., Pereira, L.S., Rodrigues, P.N., Machado, T., 2003. Coping with drought: deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Central Tunisia. In: Rossi, G., Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi, M., Zairi, A. (Eds.), Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, pp. 181–201.

Zairi A, Slatni A, Mailhol JC, El Amami H, Boubaker R, Ben Ayed M, Rebai M. 2000. Analyse-diagnostic de l'irrigation de surface dans les PPI de la Basse Vallée de la Medjerda. Numéro Spécial des Annales de l'INRGREF, Actes du Séminaire Economie de l'eau en irrigation, Hammamet, Tunisie, novembre 2000, p. 10–26.

Zairi, A., Mailhol, J.C., Nasr, N., Slatni, A., Ruelle, P., 1999. Stratégies d'irrigation gravitaire du blé dur et impact sur les rendements et la consommation d'eau-Le cas de la Tunisie. In proceedings of the 17th Transaction of the International Congress on Irrigation and Drainage: Irrigation under conditions of water scarcity, Vol. 1A. Granada, Spain, ICID, New Delhi, pp, 41-50.

Zairi, A., Slatni, A., Mailhol, J.C., Achour, H., 1998. Surface irrigation efficiency in tracking soils as influenced by water restriction, In : Pereira, L.S., Growing, J.W. (Eds), Water and Environment : Innovation Issues in Irrigation and Drainage. E&FN Spon, London, pp. 120-130

Zhi, M., 1989. Identification of Causes of Poor Performance of a Typical Large-sized Irrigation Scheme in South China. ODI/IIMI Irrigation Management Network Paper 89/1b. Overseas Development Institute: London, June.

Zoebl, D., 2006. Is water productivity a useful concept in agricultural water management? Agricultural Water Management. 84, 265–273.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Zwart, S.J., Bastiaanssen, W.G.M., 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton, and maize. Agric. Water Manage. 69, 115–133.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Annexes

Annexe 1. Exemple de résultats des calculs de l'évapotranspiration de référence par le programme EVAPOT

1985

Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Jllet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
1.03	0.94	1.20	2.92	4.61	3.52	5.89	6.12	4.30	3.14	1.76	1.04
0.88	1.29	2.28	3.10	5.41	2.87	6.45	4.48	4.13	2.93	1.67	1.12
0.87	1.35	1.82	1.76	4.95	2.83	6.07	5.26	4.19	2.88	1.72	1.05
1.41	1.08	1.63	1.87	4.74	4.96	6.00	5.87	4.08	2.86	1.48	1.00
0.91	1.22	2.05	1.93	3.55	4.31	6.23	6.28	4.19	2.99	1.77	1.00
0.89	1.04	2.07	2.95	4.57	6.23	6.73	5.37	4.37	2.81	1.68	1.04
0.71	1.24	2.03	3.42	5.24	5.96	6.36	5.93	4.30	2.58	1.46	1.14
1.17	1.28	1.91	2.57	5.44	7.54	4.94	5.85	4.15	2.73	1.55	1.04
0.97	1.34	2.09	2.89	4.07	3.79	4.72	5.19	4.09	2.77	1.68	1.08
0.82	1.43	1.35	2.73	5.18	4.98	4.63	5.37	4.02	2.60	1.40	0.90
0.77	1.46	2.20	2.44	5.01	5.35	5.46	6.76	4.19	2.78	1.48	0.91
0.66	1.37	2.04	2.74	3.65	5.91	5.48	5.93	4.15	2.59	1.61	0.88
1.32	1.95	1.68	2.64	4.86	4.82	5.38	5.58	3.99	2.55	1.40	0.93
0.58	1.68	1.86	3.16	3.11	5.33	5.38	5.14	3.67	2.58	1.32	0.84
1.00	1.39	2.53	2.30	4.31	4.74	5.69	5.64	3.59	2.40	1.36	0.93
1.11	1.21	2.89	3.68	4.02	4.53	5.82	5.20	3.65	2.12	1.40	0.89
0.80	1.17	2.34	3.60	3.77	4.22	6.13	5.06	3.48	2.10	1.28	0.92
0.81	1.30	2.54	3.78	5.21	5.01	6.88	5.52	3.33	2.34	1.29	0.96
0.89	1.53	2.41	3.85	5.51	5.26	6.75	5.70	3.48	2.21	1.32	1.09
1.40	1.53	2.48	4.12	5.00	5.54	5.95	4.55	3.57	2.43	1.24	1.00
1.46	1.79	2.70	2.52	4.68	5.40	6.50	4.37	3.66	2.07	1.37	0.96
1.67	1.63	2.47	4.03	5.88	5.62	6.06	4.91	3.41	2.07	1.38	1.01
1.78	1.58	2.28	3.91	4.67	5.75	5.79	4.94	3.57	2.18	1.19	1.04
1.46	1.83	1.68	3.14	5.47	5.78	5.29	5.27	3.34	2.05	1.29	0.94

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1.12 1.54 2.90 2.91 5.32 6.26 4.73 4.99 3.38 2.06 1.03 0.88

1.49 1.80 2.70 4.24 4.85 6.31 6.05 5.00 3.20 1.99 0.97 0.95

1.18 2.12 3.47 3.94 4.90 6.13 4.09 5.31 3.03 2.05 1.18 1.04

0.97 1.57 3.09 2.62 5.48 6.16 5.73 4.53 3.05 1.98 1.04 0.89

1.02 -77.00 2.98 3.47 5.94 6.39 6.71 3.49 3.04 1.76 1.10 0.96

1.09 -77.00 2.93 4.24 6.28 6.08 6.05 3.31 3.22 1.76 1.05 0.88

0.90 -77.00 3.46 -77.00 4.47 -77.00 3.95 3.59 -77.00 1.79 -77.00 0.77

Annexe 2. Exemple de résultats des calculs des besoins en eau d'irrigation par le logiciel Pilote

```
Résultats de l'année 1989
                    ***************************


          Stock sur Px au Semis:     294. mm


     Test d'une stratégie d'irrigation:
          Début des irrigations:   0 Jas
          Fin   des irrigations: 127 Jas
          Irrigation quand réserve mobilisable épuisée à:   50.%
          Dose de Semis:  10.0 mm  Dose > semis :  10.0 mm
          Irrigations : dates(jc) et Doses en mm
                          95          10.0
                          96          10.0
                          97          10.0
                          98          10.0
                         101          10.0
                         132          10.0
                         136          10.0
                         140          10.0
                         143          10.0
                         147          10.0
                         150          10.0
                         153          10.0
                         156          10.0
                         159          10.0
                         161          10.0
                         164          10.0
                         166          10.0
                         168          10.0
                         170          10.0
                         177          10.0
                         179          10.0
                         181          10.0
                         183          10.0
                         185          10.0
                         186          10.0
                         188          10.0
                         189          10.0
                         191          10.0
                         192          10.0
                         194          10.0
                         196          10.0
                         198          10.0
```

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

```
                    199          10.0
                    201          10.0
                    202          10.0
                    204          10.0
                    205          10.0
                    206          10.0
                    208          10.0
                    209          10.0
                    211          10.0
                    212          10.0
                    214          10.0
                    216          10.0
                    217          10.0
                    219          10.0
                    221          10.0
     Dose Totale Apportée:   470. mm

Sur le Cycle Cultural:
     Etr(Plante+Sol)
     Etr                    :   613. mm
     Etm                    :   616. mm
     Evaporation du Sol     :   152. mm
     Drainage               :     0. mm
     Hauteur de Pluie       :    87. mm

 Caractéristiques du Rendement:

     Tmat(variété): 1500.°c base 10.,soit à:135 JAS
     L.A.I Moyen:  3.1 entre  75 et 127 JAS


     Matière Sèche Totale:   11.5 T/ha
     Rendement(hu: 87.%) :   67.0 T/ha
     Rendement(hu:0 %)   :    8.7 T/ha

Sur la Durée de Simulation:
     Evaporation du Sol     :   391. mm
     Drainage               :     0. mm
```

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Annexe 3.

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES
STATISTIQUES SOMMAIRES DES VARIABLES CONTINUES
EFFECTIF TOTAL : 82 POIDS TOTAL : 82.00

NUM	IDEN - LIBELLE	EFFECTIF	POIDS	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMUM	MAXIMUM
2	SAU - SAU	82	82.00	6.80	1.01	4.70	11.50
14	%Scu - %Scult	82	82.00	0.85	0.17	0.20	1.00
15	%Cin - %Cint	82	82.00	0.15	0.20	0.00	0.96
16	%Oli - %Oliv	82	82.00	0.48	0.27	0.00	1.00
17	%Fru - %Fruit	82	82.00	0.09	0.15	0.00	0.95
18	%Mar - %Mar	82	82.00	0.18	0.21	0.00	0.89
19	%Cer - %Cer	82	82.00	0.14	0.17	0.00	0.56
20	%Fou - %Four	82	82.00	0.11	0.10	0.00	0.46
21	G(%) - G(%)	82	82.00	59.45	34.48	0.00	100.00
22	A(%) - A(%)	82	82.00	15.41	21.88	0.00	100.00
23	L(%) - L(%)	82	82.00	25.16	27.66	0.00	100.00

MATRICE DES CORRELATIONS

	SAU	%Scu	%Cin	%Oli	%Fru	%Mar	%Cer	%Fou	G(%)	A(%)	L(%)
SAU	1.00										
%Scu	0.04	1.00									
%Cin	-0.10	0.25	1.00								
%Oli	-0.31	0.29	0.49	1.00							
%Fru	0.01	0.23	-0.19	-0.26	1.00						
%Mar	-0.13	0.31	0.49	-0.07	-0.17	1.00					
%Cer	0.45	0.14	0.05	-0.40	-0.16	-0.07	1.00				
%Fou	0.13	0.21	0.34	0.09	-0.17	-0.01	0.05	1.00			
G(%)	-0.26	-0.08	0.06	0.57	-0.22	-0.26	-0.31	-0.06	1.00		
A(%)	0.37	0.03	-0.05	-0.51	-0.14	0.00	0.68	0.33	-0.60	1.00	
L(%)	0.04	0.07	-0.04	-0.30	0.39	0.33	-0.15	-0.18	-0.77	-0.04	1.00
	SAU	%Scu	%Cin	%Oli	%Fru	%Mar	%Cer	%Fou	G(%)	A(%)	L(%)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

VALEURS PROPRES
APERCU DE LA PRECISION DES CALCULS : TRACE AVANT DIAGONALISATION .. 11.0000
SOMME DES VALEURS PROPRES 11.0000
HISTOGRAMME DES 11 PREMIERES VALEURS PROPRES

NUMERO	VALEUR PROPRE	POURCENTAGE	POURCENTAGE CUMULE	
1	2.9827	27.12	27.12	**********
2	2.0698	18.82	45.93	**********
3	1.9910	18.10	64.03	**********
4	1.1565	10.51	74.55	**********
5	0.8752	7.96	82.50	**********
6	0.6929	6.30	88.80	**********
7	0.5269	4.79	93.59	**********
8	0.4876	4.43	98.02	**********
9	0.2171	1.97	100.00	******
10	0.0004	0.00	100.00	*
11	0.0000	0.00	100.00	*

COORDONNEES DES VARIABLES SUR LES AXES 1 A 5
VARIABLES ACTIVES

VARIABLES	COORDONNEES					CORRELATIONS VARIABLE-FACTEUR					ANCIENS AXES UNITAIRES				
IDEN - LIBELLE COURT	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
SAU - SAU	-0.54	-0.24	-0.23	-0.27	-0.15	-0.54	-0.24	-0.23	-0.27	-0.15	-0.31	-0.17	-0.16	-0.25	-0.16
%Scu - %Scult	-0.01	-0.28	0.55	-0.62	-0.30	-0.01	-0.28	0.55	-0.62	-0.30	-0.01	-0.19	0.39	-0.58	-0.32
%Cin - %Cint	0.25	-0.57	0.60	0.09	0.00	0.25	-0.57	0.60	0.09	0.00	0.14	-0.40	0.42	0.08	0.00
%Oli - %Oliv	0.81	-0.28	0.21	-0.18	-0.02	0.81	-0.28	0.21	-0.18	-0.02	0.47	-0.19	0.15	-0.17	-0.02
%Fru - %Fruit	-0.20	0.59	0.19	-0.63	0.05	-0.20	0.59	0.19	-0.63	0.05	-0.11	0.41	0.14	-0.59	0.05
%Mar - %Mar	-0.08	-0.15	0.77	0.42	-0.23	-0.08	-0.15	0.77	0.42	-0.23	-0.05	-0.10	0.54	0.39	-0.25
%Cer - %Cer	-0.63	-0.49	-0.25	-0.05	-0.41	-0.63	-0.49	-0.25	-0.05	-0.41	-0.36	-0.34	-0.17	-0.05	-0.44
%Fou - %Four	-0.07	-0.63	0.12	-0.23	0.69	-0.07	-0.63	0.12	-0.23	0.69	-0.04	-0.44	0.09	-0.21	0.74
G(%) - G(%)	0.85	-0.14	-0.38	-0.10	-0.17	0.85	-0.14	-0.38	-0.10	-0.17	0.49	-0.10	-0.27	-0.09	-0.18
A(%) - A(%)	-0.77	-0.46	-0.16	0.06	0.11	-0.77	-0.46	-0.16	0.06	0.11	-0.45	-0.32	-0.11	0.06	0.12
L(%) - L(%)	-0.45	0.54	0.60	0.08	0.12	-0.45	0.54	0.60	0.08	0.12	-0.26	0.38	0.43	0.07	0.13

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

CARACTERISATION PAR LES CONTINUES DES CLASSES OU MODALITES
DE Coupure 'c' de l'arbre en 6 classes

Classe 1 / 6

V.TEST	PROBA	MOYENNES CLASSE	MOYENNES GENERALE	ECARTS TYPES CLASSE	ECARTS TYPES GENERAL	VARIABLES CARACTERISTIQUES NUM.LIBELLE	IDEN
		Classe 1 / 6		(POIDS = 22.00		EFFECTIF = 22)	cc1c
4.71	0.000	89.27	59.45	11.67	34.48	21.G(%)	G(%)
3.93	0.000	0.67	0.48	0.24	0.27	16.%Oliv	%Oli
2.87	0.002	0.94	0.85	0.06	0.17	14.%Scult	%Scu
-2.94	0.002	0.07	0.18	0.10	0.21	18.%Mar	%Mar
-3.14	0.001	2.82	15.41	5.76	21.88	22.A(%)	A(%)
-3.39	0.000	7.95	25.16	11.12	27.66	23.L(%)	L(%)

Classe 2 / 6

V.TEST	PROBA	MOYENNES CLASSE	MOYENNES GENERALE	ECARTS TYPES CLASSE	ECARTS TYPES GENERAL	VARIABLES CARACTERISTIQUES NUM.LIBELLE	IDEN
		Classe 2 / 6		(POIDS = 21.00		EFFECTIF = 21)	cc2c
3.13	0.001	0.31	0.18	0.12	0.21	18.%Mar	%Mar

Classe 3 / 6

V.TEST	PROBA	MOYENNES CLASSE	MOYENNES GENERALE	ECARTS TYPES CLASSE	ECARTS TYPES GENERAL	VARIABLES CARACTERISTIQUES NUM.LIBELLE	IDEN
		Classe 3 / 6		(POIDS = 4.00		EFFECTIF = 4)	cc3c
5.45	0.000	0.75	0.18	0.12	0.21	18.%Mar	%Mar
5.25	0.000	0.68	0.15	0.22	0.20	15.%Cint	%Cin
2.31	0.010	0.78	0.48	0.20	0.27	16.%Oliv	%Oli
-3.12	0.001	5.25	6.80	0.45	1.01	2.SAU	SAU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Classe 4 / 6

V.TEST	PROBA	MOYENNES CLASSE	MOYENNES GENERALE	ECARTS TYPES CLASSE	ECARTS TYPES GENERAL	VARIABLES CARACTERISTIQUES NUM.LIBELLE	IDEN
		Classe 4 / 6		(POIDS = 12.00		EFFECTIF = 12)	cc4c
4.38	0.000	100.00	59.45	0.00	34.48	21.G(%)	G(%)
-2.14	0.016	6.22	6.80	0.75	1.01	2.SAU	SAU
-2.34	0.010	0.02	0.15	0.05	0.20	15.%Cint	%Cin
-2.45	0.007	0.02	0.14	0.05	0.17	19.%Cer	%Cer
-2.62	0.004	0.00	15.41	0.00	21.88	22.A(%)	A(%)
-2.95	0.002	0.02	0.18	0.04	0.21	18.%Mar	%Mar
-3.18	0.001	0.02	0.11	0.06	0.10	20.%Four	%Fou
-3.39	0.000	0.00	25.16	0.00	27.66	23.L(%)	L(%)
-5.28	0.000	0.61	0.85	0.21	0.17	14.%Scult	%Scu

Classe 5 / 6

V.TEST	PROBA	MOYENNES CLASSE	MOYENNES GENERALE	ECARTS TYPES CLASSE	ECARTS TYPES GENERAL	VARIABLES CARACTERISTIQUES NUM.LIBELLE	IDEN
		Classe 5 / 6		(POIDS = 8.00		EFFECTIF = 8)	cc5c
6.58	0.000	86.63	25.16	13.05	27.66	23.L(%)	L(%)
4.18	0.000	0.31	0.09	0.30	0.15	17.%Fruit	%Fru
-2.19	0.014	0.01	0.14	0.02	0.17	19.%Cer	%Cer
-2.30	0.011	0.27	0.48	0.14	0.27	16.%Oliv	%Oli
-2.50	0.006	0.02	0.11	0.04	0.10	20.%Four	%Fou
-4.23	0.000	10.13	59.45	14.29	34.48	21.G(%)	G(%)

Classe 6 / 6

V.TEST	PROBA	MOYENNES CLASSE	MOYENNES GENERALE	ECARTS TYPES CLASSE	ECARTS TYPES GENERAL	VARIABLES CARACTERISTIQUES NUM.LIBELLE	IDEN
		Classe 6 / 6		(POIDS = 15.00		EFFECTIF = 15)	cc6c
7.78	0.000	55.40	15.41	14.40	21.88	22.A(%)	A(%)
5.68	0.000	0.37	0.14	0.14	0.17	19.%Cer	%Cer
3.55	0.000	7.64	6.80	1.23	1.01	2.SAU	SAU
2.37	0.009	0.16	0.11	0.11	0.10	20.%Four	%Fou
-3.85	0.000	0.24	0.48	0.17	0.27	16.%Oliv	%Oli
-4.40	0.000	23.80	59.45	16.16	34.48	21.G(%)	G(%)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Annexe 4 : Capture d'écran d'un exemple de sortie du programme DEAP (calcul des scores d'efficience)

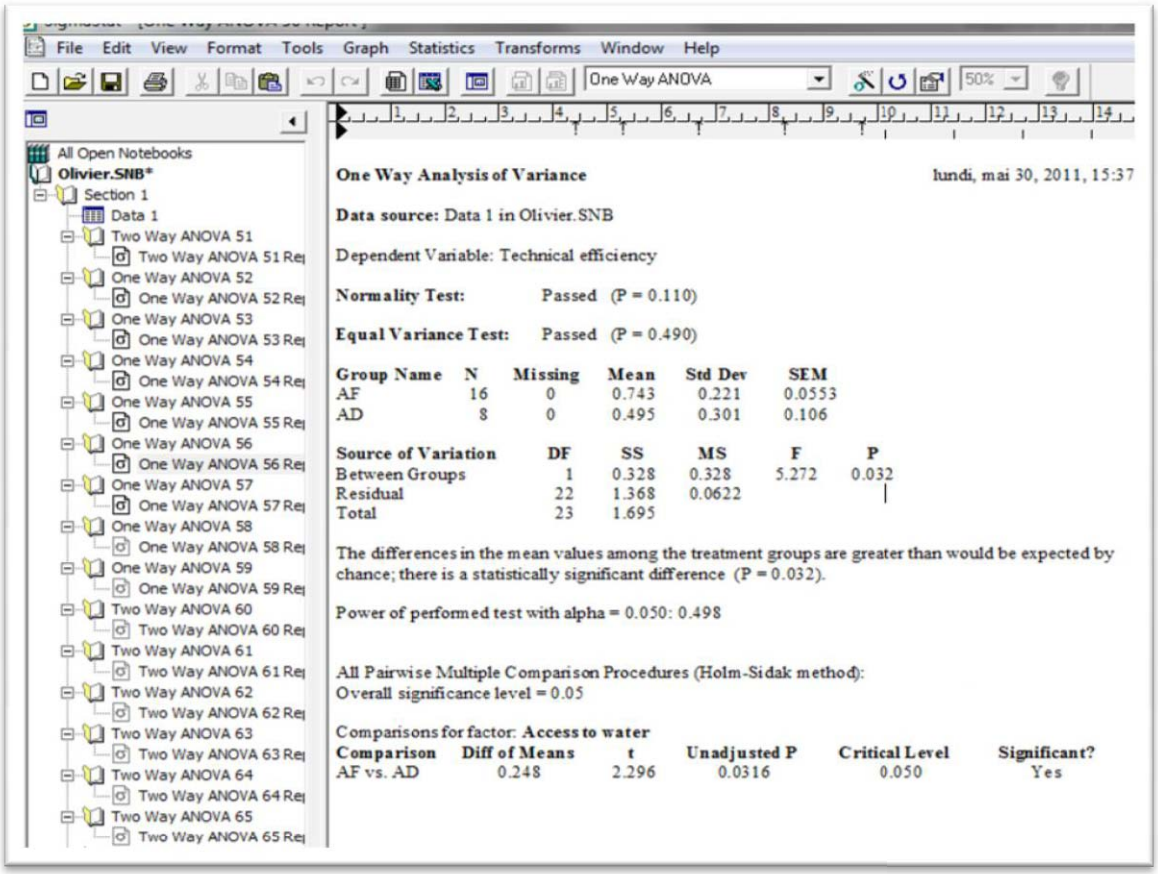
EG2-out.txt - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

```
 Results from DEAP Version 2.1

Instruction file = Eg2-ins.txt
Data file        = eg2-dta.txt

 Output orientated DEA

 Scale assumption: VRS

 Slacks calculated using multi-stage method


 EFFICIENCY SUMMARY:

  firm  crste  vrste  scale

    1  0.762  0.763  0.999 drs
    2  0.765  0.776  0.987 drs
    3  0.705  0.877  0.804 irs
    4  0.620  0.621  0.998 drs
    5  0.374  0.383  0.977 irs
    6  1.000  1.000  1.000  -
    7  0.641  0.641  1.000  -
    8  0.992  1.000  0.992 drs
    9  0.618  0.639  0.967 irs
   10  0.849  0.940  0.903 drs
   11  0.751  1.000  0.751 irs
   12  0.674  0.695  0.969 drs
   13  0.757  1.000  0.757 drs
   14  0.739  1.000  0.739 drs
   15  1.000  1.000  1.000  -
   16  0.982  1.000  0.982 irs
   17  0.934  1.000  0.934 irs
   18  0.369  0.381  0.970 drs
   19  0.769  0.833  0.924 drs
   20  1.000  1.000  1.000  -
   21  1.000  1.000  1.000  -
   22  0.557  0.595  0.937 drs
   23  0.750  0.804  0.933 drs
   24  0.871  0.872  0.999 drs
   25  0.808  1.000  0.808 irs
   26  0.874  0.925  0.945 drs

 mean  0.775  0.836  0.934

Note: crste = technical efficiency from CRS DEA
      vrste = technical efficiency from VRS DEA
      scale = scale efficiency = crste/vrste
```

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Annexe 5 : Capture d'écran de la sortie du logiciel SigmaStat : Analyse de la variance des scores d'efficiences en relation avec l'accès à l'eau (AF : accès facile, AD : accès difficile)



CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref