



De l'identification des contraintes environnementales à l'évaluation des performances agronomiques dans un système irrigué collectif: cas de l'oasis de Fatnassa (Nefzaoua, sud tunisien)

W. Ghazouani

► To cite this version:

W. Ghazouani. De l'identification des contraintes environnementales à l'évaluation des performances agronomiques dans un système irrigué collectif: cas de l'oasis de Fatnassa (Nefzaoua, sud tunisien). Sciences de l'environnement. ED SIBAGHE, Institut des Sciences et Industries du vivant et de l'Environnement, AgrParisTech, Montpellier, France, Doctorat en Sciences de l'eau, 2009. Français. NNT: . tel-02599012

HAL Id: tel-02599012

<https://hal.inrae.fr/tel-02599012>

Submitted on 16 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.



N° / / / / / / / / / /

THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de
**Docteur de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de
l'Environnement (AgroParisTech)**
Spécialité : Sciences de l'eau

Par

Wafa GHAZOUANI

**De l'identification des contraintes environnementales à l'évaluation des
performances agronomiques dans un système irrigué collectif.**

Cas de l'oasis de Fatnassa (Nefzaoua, sud tunisien).

Soutenue publiquement le 16 décembre 2009

A l'Ecole Nationale du génie Rural, des Eaux et des Forêts, Montpellier, France

Devant le jury composé de :

M. Alain VIDAL , Directeur du CPWF, <i>CPWF, Colombo (Sri Lanka)</i>	Directeur de Thèse
Mme. Delphine LEENHARDT , Directrice de recherches, <i>INRA, Toulouse (France)</i>	Rapporteur
M. Netij BEN MECHLIA , Professeur, <i>INA, Tunis (Tunisie)</i>	Rapporteur
M. Cyril KAO , Directeur Scientifique Adjoint, <i>AgroParisTech, Paris (France)</i> ..	Président de jury
Mme. Anne BIARNES , Chargée de recherche, <i>IRD, Montpellier (France)</i>	Examinatrice
M. Vincent DOLLÉ , Directeur de l'IAMM, <i>CIHEAM, Montpellier, (France)</i> ...	Examineur
Mlle. Insaf MEKKI , Chargée de recherche, <i>INRGREF, Tunis (Tunisie)</i>	Invitée

*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)*

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre du projet SIRMA (économies d'eau en Système IRrigué au Maghreb) au sein du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) et de l'UMR Gestion de l'EAU, Acteurs, Usages (G-EAU) à Montpellier (France), et 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) à Tunis (Tunisie). Au-delà de l'allocation de recherche durant les trois années de thèse, le projet SIRMA a été avant tout un espace convivial propice à l'échange et aux rencontres. La richesse des rencontres m'a permis d'évoluer tant sur le plan professionnel que personnel.

Je profite de ce mémoire pour remercier avec un très grand plaisir et une grande émotion toute personne qui a participé de près ou de loin au bon déroulement et à l'aboutissement de cette thèse.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à Alain Vidal d'avoir accepté de diriger ce travail alors qu'il n'en manquait pas par ailleurs ! 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.

Serge Marlet a eu un rôle clé dans l'initiation de cette thèse, je tiens à lui exprimer ma reconnaissance pour ses orientations dans mes débuts dans la recherche, pour son appui continu tout au long de ce travail, et pour le suivi rigoureux des différentes phases du début à la fin.

Ma profonde estime à Insaf Mekki, sa présence a été toujours déterminante dans mes blocages en SIG, et dans le déchiffrage des noms aussi semblables des agriculteurs ! Elle m'a toujours facilité la tâche de terrain, et a toujours été disponible pour répondre à mes questions parfois naïves, et pour me remonter le moral.

Je remercie également les rapporteurs de cette thèse, Delphine Leenhardt (France) et Netij Ben Mechlia (Tunisie) pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture et l'évaluation de mon document et à l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Merci également à Anne Biarnes, Cyril Kao et Vincent Dollé d'avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Je remercie aussi Fethi Bouksila de l'INRGREF pour son aide et d'avoir mis à ma disposition le matériel nécessaire pour les mesures de la salinité des sols et de la nappe sur le terrain et au laboratoire.

L'accueil dans différentes institutions de recherche, le CIRAD, l'INRGREF et le Cemagref m'a permis d'acquérir un regard croisé sur la problématique des périmètres irrigués. La qualité des discussions ont solidement contribué à l'avancée de ma réflexion, un grand merci à Marcel Kuper, Abdelaziz Zaïri, Jean-Louis Fusiller, Pierre-Yves Le Gal, Jean-Yves Jamin, Bruno Lidon et Patrick Bisson.

Ma reconnaissance s'adresse également aux membres du comité de pilotage : Christelle Pezon, Sami Bouarfa, et Michel Passouant, avec qui j'ai pu discuter et orienter mon travail de recherche.

Je souhaite également exprimer mes remerciements au commissariat régional de développement agricole (CRDA) de Kébili. Plus particulièrement à Abdellah Omrani et Ahmed Dekhil pour m'avoir facilité le travail de terrain. Je ne saurais oublier l'aide du personnel du groupement de développement agricole (GDA) de Fatnassa, plus particulièrement Béchir Neguib pour avoir mis à ma disposition les fiches de suivi de l'irrigation.

Je voudrais aussi remercier Marie-Christine Naffrechoux et Sylvie Daux pour la gestion logistique de mes séjours en France.

Cette thèse ne serait bien sûr rien sans les agriculteurs de Fatnassa qui ont su répondre avec enthousiasme à toutes mes questions. Un grand merci à Mehdi qui m'a aidée à déchiffrer et à reconstruire le parcellaire aussi compliqué de l'oasis, aux jeunes qui m'ont aidée à faire les trous de tarière qui à chaque fois jaillissent du 'nezz', Saber, Abdel Kader et Mohamed qui, en période de récolte, m'a aidée à transporter des caisses pleines d'échantillons de sol et pas de dattes ! à Ahmed qui m'a aidée à compter les palmiers, ça paraît simple mais ce n'est pas évident !

Mon passage sur le terrain était aussi un moment agréable d'échange loin des livres et des sciences, je n'oublierais les couscous partagés sur le terrain dans l'ambiance de la récolte, mon initiation au tri des dattes entre les bonnes mains des femmes, et les régimes de dattes, les thés parfumés, les pains traditionnels, et le lait de chèvre offerts sur le chemin de l'oasis avec tant d'affection. Aussi il me faudrait remercier ici tous les 'Fatnassiens' et tout particulièrement les familles de Mehdi Jomâa, Abdallah Attia, Salah Mansour, El Bechir Ennouri, Ben Mousbah, Ahmed Dekhil, Miloudi Krisi, Amara Dekhil qui m'ont accueillie si chaleureusement chez eux et qui ont fait de mon séjour à Fatnassa un séjour convivial dans une grande famille que de toute une vie on ne peut oublier. Je garde un souvenir nostalgique de cette hospitalité légendaire des oasiens.

Je pense à Catherine pour ses prestigieux conseils et orientations, mais aussi pour la bonne humeur, l'ambiance et la richesse des discussions autour des plats du soir, merci pour le riz !

Je pense aussi aux thésards et stagiaires, les compagnons de route, avec qui j'ai partagé les bons moments de détente et de rigolade autour des repas de midi, les baisses et les remontées du moral, je pense à Salia, Olaya, Emeline, Marleny, Zhour, Ermias, Imed, Ali.

Ma profonde estime à Eliane et Jean-Claude Bethune, vous avez su être pour moi une véritable famille, merci pour cet accueil si chaleureux et pour l'énergie que vous avez su me donner tout au long de mon séjour chez vous, d'avoir partagé mes peines et mes soucis, merci aussi pour les discussions enrichissantes. Jean-Claude un très grand merci pour les cafés et les pains de 4h du matin préparés pour mon '*S'hour*'.

Et finalement, ma grande reconnaissance à ma famille qui m'a toujours soutenue dans la recherche de mon chemin.

« ولعمري إنَّ الحياة ظلامٌ إلا إذا صاحبها الحافز، وكلُّ حافزٍ ضريير إلا إذا اقترنَ بالمعرفة، وكلُّ معرفةٍ هباء، إلا إذا رافقها العمل، وكل عملٍ خواء، إلا إذا امتزج بالحبِّ، فإذا امتزجَ عملُك بالحبِّ فقد وصلتَ نفسك بنفسك، وبالناس وبالله.

وما يكون العمل الممزوج بالحبِّ ؟

هُوَ أن تَنسِجَ الثوبَ بخيوطِ مَسْلُولَةٍ من قلبك، كما لو كان هذا الثوب سِيرتديهِ من تُحِب، هو أن تبني داراً والمَحَبَّة رائدك، كما لو كانت هذه الدار ستضمُّ مَنْ تُحِبُّ.

هو أن تنثرَ البُذورَ في حنانٍ وتَجْمَعَ حَصَادَكَ مُبْتَهَجاً، كما لو كانت الثمارُ سيأكلها مَنْ تُحِب، وإذا أنتَ عَصَرْتَ الكَرَمَ مُتَبَرِّماً، فَسَوْفَ يَتَقَاطَرُ تَبَرُّمُكَ فِي الخمرِ سُمّاً.»

النبي لجبران خليل جبران (1923)

RESUME

Dans les zones arides et semi-arides, les performances des systèmes irrigués collectifs et leur durabilité sont souvent remises en question. Le point de départ de notre démarche est le constat que les approches disciplinaires qui ont abordé les performances de ces systèmes restent fragmentaires et ne permettent pas d'identifier les déterminants effectifs des performances ni d'évaluer leurs effets dans un milieu réel fortement anthropisé avec un fonctionnement complexe. Il est ainsi difficile d'établir les interventions les mieux adaptées. Proposer une approche plus intégrée d'analyse du fonctionnement et d'évaluation des performances, tel est l'objectif général de notre recherche appliquée à une oasis du sud tunisien.

Notre démarche s'articule en deux principales étapes. La première étape consiste en une analyse diagnostic basée sur une confrontation des perceptions des agriculteurs avec le diagnostic des ingénieurs dans l'optique d'une analyse critique du discours et des pratiques des agriculteurs. Cette étape nous a permis d'identifier les principales contraintes et leurs effets, mais aussi de comprendre les pratiques d'adaptation des agriculteurs aux contraintes de leur environnement. A partir de l'élaboration d'une représentation conceptuelle du fonctionnement de l'aménagement et d'un ensemble d'indicateurs issus de la phase de diagnostic, la seconde étape consiste en deux évaluations successives. Dans un premier temps, l'analyse de la performance de la gestion individuelle et collective de l'irrigation met en évidence le rôle d'un ensemble de déterminants sociotechniques sur l'allongement du tour d'eau, liés à des pratiques inappropriées et à un faible engagement de certains agriculteurs. Dans un second temps, l'analyse des performances quantitatives et qualitatives du palmier dattier met en évidence l'influence de la conduite de l'irrigation, et des contraintes de salinité et d'engorgement en interaction. Les regards croisés de l'hydraulicien et de l'agronome nous ont permis de dégager les principaux mécanismes qui déterminent la stratégie et les pratiques des agriculteurs, et les performances des palmeraies.

Notre démarche illustre le besoin d'un changement de posture, des approches normatives classiques et des approches participatives, pour la mise en œuvre d'interventions adaptées. Il s'agit ainsi de comprendre les spécificités locales et le contexte social et historique mais aussi la logique d'action des agriculteurs pour en adapter les changements techniques projetés. Ce travail s'inscrit dans une démarche de recherche-action qui tente de spécifier *in fine* les priorités d'intervention et d'accompagnement des agriculteurs.

Mots clés : gestion de l'irrigation, perception, pratiques des agriculteurs, règles collectives, engorgement, salinité, palmier dattier, performance, oasis, Tunisie.

ABSTRACT

In arid and semi-arid regions, the questions of the performance and the durability of community-managed irrigation schemes are often raised. Disciplinary approaches dealing with these issues are often fragmentary and do not enable neither identifying the effective root causes that hinder community-management of irrigation, nor evaluating their effect on the performances of irrigated systems in such regions. In this context, the present study sought to narrow these gaps by conducting an integrated approach of a comprehensive analysis of constraints and structured assessment of the performances in an oasis located in southern Tunisia. The aim was to help prioritizing intervention in complex systems.

A diagnostic analysis according to farmers' perceptions and engineering approach was first conducted. A critical analysis of the farmers' discourses and practices enabled us to identify the principal constraints and their effects on the performance of the system, but also to understand farmers' adaptation practices to the environmental constraints. According to a set of indicators identified following the diagnosis analysis, evaluations of irrigation management and date palm performances were then performed. The assessment of the performance of irrigation management at community irrigation scheme and field levels highlights that the low frequency of the water delivery turns is related to socio-technical factors especially due to inappropriate practices and a low commitment of some farmers. The analysis of the quantitative and qualitative performances of the date palm trees highlights the effect of interacting abiotic constraints and some missed practices.

The approach illustrates the complexity of the system and the need for a posture change, of traditional normative and participative approaches, for the implementation of adapted interventions. It is thus a question of including local specificities and social and historical context but also the farmer's action logic to adapt the projected technical changes.

Key words: irrigation management, perception, farmers' practices, collective rules, waterlogging, salinity, date palm, performance, oasis, Tunisia.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RESUME	ix
ABSTRACT	x
TABLE DES MATIÈRES	xi
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES TABLEAUX	xvii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre 1 : Approches d'étude des périmètres irrigués, problématique et objectifs de la thèse.....	5
1.1 Approches méthodologiques d'étude des performances des systèmes irrigués collectifs.....	5
1.1.1 Les approches biophysiques des performances.....	6
1.1.1.1 Performance hydraulique	6
1.1.1.2 Performance agronomique	7
1.1.1.3 Performance environnementale	8
1.1.2 Performance sociale et organisationnelle.....	8
1.1.3 Les dimensions transdisciplinaires et participative de l'irrigation	10
1.1.4 Conclusion	12
1.2 Problématique et objectifs	12
1.2.1 Problématique générale	12
1.2.2 Objectif global de la thèse.....	13
1.2.3 Objectifs scientifiques et finalisés.....	14
1.2.4 Positionnement et choix techniques	16
1.2.5 Démarche suivie.....	17
<i>Partie A : L'Eau, le sel et la terre : Identification des contraintes & Mise en place d'un système d'évaluation des performances.....</i>	19
Chapitre 2 : Un cas d'étude des oasis du Nefzaoua : une longue et riche histoire vs. une situation actuelle préoccupante	21
2.1 La région du Nefzaoua : historique, enjeux et défis.....	21
2.1.1 Historique et importance socio-économique.....	21
2.1.2 Climat	23
2.1.3 Extension des surfaces irriguées et contraintes environnementales	24
2.2 L'oasis de Fatnassa, un système ancien largement anthropisé.....	26
2.2.1 Localisation géographique	27
2.2.2 Le milieu physique	27
2.2.3 Ressources en eau, réseau de distribution d'eau et gestion de l'irrigation.....	27
2.2.4 Structure de drainage	31
2.2.5 Le système de production	32
2.2.6 Le foncier, morcellement vs. extension et officialisation	32
2.2.7 Le calendrier culturel.....	34
2.3 Conclusion.....	36

Chapitre 3 : Confrontation de la vision d'ingénieur et de la perception et des pratiques d'adaptation des agriculteurs.....37

Résumé	37
3.1 Introduction	38
3.2 Methods.....	40
3.2.1 Elicitation of farmers' perceptions.....	40
3.2.2 Schematic representation of constraints.....	40
3.3 Oasis modernization and technical improvements	41
3.4 Farmers' discourse and practices.....	43
3.4.1 Low frequency of the water delivery turn.....	44
3.4.2 Waterlogging and drainage.....	45
3.4.3 Hot irrigation water	45
3.5 Discussion.....	46
3.5.1 Farmers' perceptions	46
3.5.2 Limits and possible synergy of the approaches.....	48
3.6 Conclusion.....	49

Chapitre 4 : Conception du système d'évaluation des performances hydrauliques et agronomiques de l'oasis.....51

4.1 Introduction	51
4.2 Hypothèses et dysfonctionnements	52
4.2.1 Les relations potentielles	52
4.2.2 Faible fréquence du tour d'eau.....	53
4.2.3 Faible performance du palmier dattier.....	53
4.3 Description des variables et choix de validation	55
4.3.1 Les variables d'irrigation.....	55
4.3.2 Les variables du milieu physique	56
4.3.3 Les variables biotiques et modes de conduite des palmeraies.....	60
4.3.4 Les variables socio-économiques.....	65
4.4 Restructuration des variables.....	66
4.4.1 Conceptualisation du système irrigué.....	66
4.4.2 Implémentation physique et base de données	67
4.5 Conclusion.....	68

Parie B : L'eau et les dattes : Evaluation des performances individuelle et collective de l'irrigation & Déterminants de la performance des palmeraies.....69

Chapitre 5 : Pratiques individuelles versus gestion collective de l'irrigation71

Résumé	71
5.1 Introduction	72
5.2 Data and analyses.....	74
5.3 Results	75
5.3.1 Irrigation interval.....	75
5.3.2 Influence of the irrigated area	77
5.3.3 Influence of the irrigation duration.....	77

5.3.4 Root causes of the high irrigation durations	79
5.3.4.1 Influence of field size and night irrigation events ratio	79
5.3.4.2 Influence of field size and farmer's involvement	82
5.3.4.3 Influence of irrigation system, farmer's involvement and night irrigation events	83
5.4 Discussion.....	84
5.5 Conclusion.....	87
Chapitre 6 : Contraintes abiotiques, conduites des palmeraies et leur influence sur les performances du palmier dattier	89
6.1 Introduction	89
6.2 Matériel et méthodes.....	92
6.2.1 Choix des indicateurs d'évaluation	92
6.2.2 Les indicateurs agronomiques.....	92
6.2.3 Les indicateurs de l'état du milieu physique.....	94
6.2.4 Méthodes.....	95
6.2.4.1 Caractérisation des palmeraies	95
6.2.4.2 Interaction des facteurs du milieu.....	95
6.2.4.3 Méthodes d'évaluation des effets des facteurs limitants des performances des pieds Deglet Nour.....	96
a. Analyse de la variance.....	96
b. Courbe enveloppe.....	96
6.3 Résultats.....	98
6.3.1 <i>Caractérisation des palmeraies</i>	98
6.3.1.1 Distribution spatiale des palmeraies	98
6.3.1.2 Le rendement au sein des palmeraies.....	98
6.3.1.3 Quantité de dattes vs. qualité des dattes.....	100
6.3.2 Caractérisation des interactions des contraintes abiotiques	100
6.3.2.1 Les variables qui déterminent la salinité du sol.....	101
6.3.2.2 Déterminants de la salinité de la nappe.....	103
6.3.2.3 Profondeur de la nappe et fréquence des irrigations.....	103
6.3.3 Influence des facteurs limitants sur les performances qualitatives et quantitatives des pieds Deglet Nour	104
6.3.3.1 Facteurs limitants et choix d'analyses	104
6.3.3.2 Influence de la conduite de l'irrigation.....	107
6.3.3.3 Influence de la salinité du sol et de la fréquence des amendements sableux	111
6.3.3.4 Influence de la profondeur de la nappe.....	114
6.3.3.5 Influence de la conduite de palmeraie et de la densité plantation	117
6.4 Discussion.....	121
6.4.1 Une sensibilité différenciée des performances quantitatives et qualitatives	121
6.4.2 Un retour sur la démarche méthodologique.....	121
6.5 Conclusion.....	124
RECOMMANDATIONS POUR AMELIORER LES PERFORMANCES DES PALMERAIES	127
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	133
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	141

LISTE DES FIGURES

Chapitre 2

<i>Figure 2.1 : Les oasis du Nefzaoua, et localisation de l'oasis de Fatnassa (Adaptée de Marini and Ongaro, 1988).</i>	23
<i>Figure 2.2 : Parcellaire, Réseau d'irrigation & Réseau de drainage dans l'oasis de Fatnassa Nord (n=499 parcelles, 2006-07).</i>	28
<i>Figure 2.3 : Le système d'irrigation individuel : (a) traditionnel avec grands bassins, (b) traditionnel avec petits bassins, (c) californien en bandes, et (d) amélioré en conduite PVC.</i>	29
<i>Figure 2.4 : Historique du parcellaire de l'oasis de Fatnassa ; Z1 (1920-30), Z2 (1950-60) Z3 (1969), Z4 (1975-07) et Z5 (1978-07).</i>	33

Chapitre 3

<i>Figure 3.1: Problem tree based on the modernization projects.</i>	42
<i>Figure 3.2: Problem tree according to the farmers' discourse.</i>	43

Chapitre 4

<i>Figure 4.1 : Relations de causalité de la dégradation de la performance du palmier dattier.</i>	54
<i>Figure 4.2 : Position verticale (a) et horizontale (b) de l'EM-38.</i>	56
<i>Figure 4.3 : Variabilité du profil salin en fonction de la fréquence d'irrigation et de la profondeur et la salinité de la nappe.</i>	57
<i>Figure 4.4 : Carte d'interpolation de la profondeur de la nappe et variogramme correspondant ; (Février 2008, n=165 points de contrôle).</i>	59
<i>Figure 4.5 : Carte d'interpolation de la conductivité électrique de la nappe et variogramme correspondant ; (Février 2008, n=165 points de contrôle).</i>	60
<i>Figure 4.6 : Les différents types de palmeraies</i>	62
<i>Figure 4.7 : Validation de l'estimation du rendement Deglet Nour en dattes branchées ; (Année agricole 2006-07, n=42).</i>	65

Chapitre 5

<i>Figure 5.1: Evolution of irrigation intervals during the agricultural year 2006-07 in the three irrigated sectors of Fatnassa oasis.</i>	76
<i>Figure 5.2: Histogram of irrigation duration with respect to the current rule of 10 h.ha⁻¹ and the former rule of 14 h.ha⁻¹ (n=419, 2006-07).</i>	79
<i>Figure 5.3: Mean irrigation duration according to field size and the frequency of night irrigation events (n=419, 2006-07).</i>	82
<i>Figure 5.4: Mean irrigation duration according to field size and farmer's involvement (n=419, 2006-07).</i>	83
<i>Figure 5.5: Mean irrigation duration according to irrigation system, frequency of night irrigation events, and farmer's involvement (n=419, 2006-07).</i>	84

Chapitre 6

<i>Figure 6.1 : Densité de plantation vs. surface de parcelle.</i>	<i>93</i>
<i>Figure 6.2 : Distribution spatiale des différents types de palmeraies (n=499 parcelles, 2006-07).</i>	<i>99</i>
<i>Figure 6.3 : Performance des plantations de palmier dattier et influence variétale (n=337, 2006-07).</i>	<i>100</i>
<i>Figure 6.4 : Variabilité de la quantité et de la qualité des dattes DN produites (n=337, 2006-07).</i>	<i>101</i>
<i>Figure 6.5 : Influence de la durée d'irrigation annuelle (a), de la salinité de la nappe (b), de la profondeur de la nappe (c) sur la salinité du sol ; n=416.</i>	<i>102</i>
<i>Figure 6.6 : Variabilité de la salinité de la nappe en fonction de la profondeur de la nappe (a) et en fonction de la durée d'irrigation annuelle (b) ; n=499.</i>	<i>104</i>
<i>Figure 6.7 : Influence de la fréquence des irrigations hivernales (a), et des irrigations estivales sur la profondeur de la nappe ; n=419.</i>	<i>104</i>
<i>Figure 6.8 : Influence du nombre des irrigations estivales et hivernales sur les potentiels qualitatifs et qualitatifs de production de dattes.</i>	<i>109</i>
<i>Figure 6.9 : Influence de la durée d'irrigation sur les performances, médianes et potentielles, quantitatives (a) et qualitatives (b) des pieds Deglet Nour.</i>	<i>110</i>
<i>Figure 6.10 : Influence de la salinité du sol sur les performances, médianes et potentielles, quantitatives (a) et qualitatives (b) du palmier dattier.</i>	<i>112</i>
<i>Figure 6.11 : Effet de la fréquence des amendements sur les potentiels quantitatifs (a) et qualitatifs (b) des pieds Deglet Nour.</i>	<i>113</i>
<i>Figure 6.12 : Influence de la profondeur de la nappe sur les performances, médianes et potentielles, quantitatives (a) et qualitatives (b) des pieds Deglet Nour.</i>	<i>115</i>
<i>Figure 6.13 : Effet conjugué (profondeur de la nappe x durée d'irrigation annuelle) sur le potentiel qualitatif des pieds Deglet Nour.</i>	<i>116</i>
<i>Figure 6.14 : Influence de la conduite de palmeraie sur le potentiel quantitatif (a) et qualitatif (b) des pieds Deglet Nour.</i>	<i>118</i>
<i>Figure 6.15 : Influence de la densité de plantation sur les performances, médianes et potentielles, quantitatives (a) et qualitatives (b) des pieds Deglet Nour.</i>	<i>119</i>

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 5

<i>Table 5.1: Mean indicators of irrigation performance in Fatnassa oasis (2,836 irrigation events during the agricultural year 2006-07 for n=419 irrigated plots).....</i>	<i>78</i>
<i>Table 5.2: Mean irrigation duration (h.ha-1) for different sources of variation at the field level.</i>	<i>80</i>
<i>Table 5.3: Variance analysis of irrigation duration (h.ha-1) at the field level: General Linear Model, (r²=0.41, n= 419, 2006-07).</i>	<i>81</i>

Chapitre 6

<i>Tableau 6.1 : Analyse de la variance du rendement total et du rendement de dattes branchées des pieds DN (2006-07, n=337).</i>	<i>106</i>
<i>Tableau 6.2 : Effets conjugués des facteurs limitants des performances du palmier dattier (quantité et qualité des dattes), ANOVA deux facteurs ; n=337.</i>	<i>107</i>

INTRODUCTION GENERALE

L'agriculture irriguée était et reste toujours un pilier important pour subvenir aux besoins alimentaires d'une population en expansion continue. En effet, au niveau mondial l'agriculture irriguée contribue aujourd'hui à 30% de toute la production agricole sur 17% du potentiel des terres cultivables (Hillel, 2000). Concernant les pays en voie de développement, l'agriculture irriguée a contribué à l'accomplissement considérable de leurs objectifs de développement agricole et rural dans la mise en place d'une agriculture de rente et dans la lutte contre la pauvreté. Dans ces pays, l'agriculture irriguée fournit aujourd'hui 40% des besoins alimentaires sur 20% des superficies cultivées (FAO, 2002). Demain, on demandera encore à l'agriculture irriguée d'améliorer sa production pour répondre à des besoins qui vont aller en grandissant avec l'augmentation de la population. Toutefois, et si les marges de progrès sont encore possibles (FAO, 2002), la durabilité de l'agriculture irriguée dans les régions arides et semi arides est de plus en plus menacée. En effet, le passage d'une agriculture pluviale à une agriculture irriguée - qui est aussi un passage d'une agriculture de subsistance à une agriculture de rente- constitue une menace considérable pour les ressources en eau et en sol.

Les pays du Maghreb se caractérisent par des particularités sociales, culturelles et historiques en relation avec les droits d'eau ancestraux, les modes d'organisation des usagers, et le riche héritage de savoir-faire en hydraulique agricole. Or, ces pays présentent eux aussi leur propre problématique de durabilité de l'agriculture irriguée. Ils sont très marqués par la surexploitation de la ressource en eau et de la détérioration de sa qualité mais aussi par l'extrême fragilité de leur écosystème. Depuis les années 70, une politique de développement rural a été mise en place et les systèmes irrigués ont bénéficié des changements techniques et institutionnels pour faire face aux contraintes liées à l'irrigation, la salinisation des eaux et des sols et l'hydromorphie. Néanmoins, et malgré les investissements publics importants, les périmètres publics irrigués associant des collectifs¹ d'agriculteurs apparaissent souvent moins performants que les périmètres irrigués privés (Al Atiri, 2005 ; Marlet et al., 2006 ; Kuper et al. 2009).

Les oasis du sud tunisien constituent un cas particulier. En effet, ces oasis témoignent de plusieurs siècles de mise en place d'une technicité ingénieuse en matière d'irrigation et de drainage, et de maîtrise de la gestion collective de ressources rares en eau et en terre. De plus, la phoeniculture constitua depuis jadis une agriculture de rente. Cependant, le tarissement des

¹ Un système irrigué est dit collectif ou encore public si la mobilisation de l'eau (dimensionnement, construction et maintenance des réseaux principaux) est financée par l'Etat. La gestion de l'irrigation est généralement déléguée à une association locale d'irrigants, le Groupement de Développement Agricole.

sources qui alimentaient les oasis a menacé la survie de cette activité millénaire. C'est pourquoi, depuis les années 70, une politique nationale de sécurisation de la ressource en eau a été mise en place, puis suivie récemment par un programme d'amélioration de l'efficacité des systèmes irrigués dans le cadre de la double politique d'économie d'eau et de valorisation des ressources en eau et en sol utilisées. Malgré ces investissements et malgré cet héritage de maîtrise de la gestion de l'irrigation, la productivité des ressources utilisées restent loin du potentiel, et la durabilité de ces systèmes est menacée.

Dans ce contexte aussi marqué par la remise en question de la durabilité des systèmes irrigués collectifs, les changements techniques et institutionnels n'ont pas atteint leurs objectifs et les performances hydrauliques et agronomiques réelles restent inférieures à celles prévues. Il convient alors de s'interroger sur les facteurs effectifs qui influencent les performances d'un périmètre irrigué collectif, et sur l'adaptabilité des interventions aux spécificités locales et au contexte social et historique. Notre objectif de recherche s'inscrit dans ce contexte, il s'agit du développement de méthodes d'analyse du fonctionnement et d'évaluation des performances d'un périmètre irrigué collectif.

L'originalité de notre démarche consiste à combiner différentes approches disciplinaires pour analyser le fonctionnement et évaluer les performances d'une oasis représentative de la problématique des périmètres irrigués collectifs. Il s'agit tout d'abord de comprendre le fonctionnement de ce système dans son contexte social et historique, d'identifier ensuite les principales contraintes et leur relation de causalité telles qu'elles sont diagnostiquées par l'ingénieur et perçues par les agriculteurs, puis d'en évaluer les effets sur les performances individuelles et collectives de la gestion de l'irrigation et sur les performances agronomiques des palmeraies. Cette démarche a été appliquée à l'oasis ancienne de Fatnassa (137.44 ha) dans le sud tunisien. Cette oasis est actuellement soumise à de fortes pressions sur les ressources en eau souterraines peu renouvelables et des contraintes environnementales et socioéconomiques typiques des oasis et des périmètres collectifs. Outre la représentativité de la complexité de la région de Nefzaoua, la petite taille de l'oasis et la diversité des pratiques et des stratégies des agriculteurs nous a permis d'appréhender cette complexité et d'explorer les deux niveaux d'échelle, l'échelle de l'aménagement et l'échelle de la parcelle.

Notre approche s'avère nécessaire dans une optique d'amélioration de la productivité des ressources en eau et en sol et de réussite des interventions dans les périmètres irrigués collectifs. En effet, basée sur une reconnaissance de la diversité des milieux physiques et humains qui

composent ces oasis, elle permet de dépasser les modèles techniques applicables à tout système irrigué sans considérer ni les spécificités locales ni le contexte social et historique. Notre démarche offre ce contexte d'analyse dans la mesure où elle se fonde sur le discours de l'agriculteur et la compréhension de sa logique d'action qui témoigne de sa capacité à gérer les contraintes de son environnement, même s'il n'en appréhende pas tous les processus.

Nous avons fait le choix de présenter ce mémoire de thèse de la manière suivante : deux articles rédigés en anglais dont un publié et un soumis dans la revue *irrigation and drainage*, et quatre chapitres rédigés en français. Le premier chapitre traite le cadre théorique en matière d'analyse du fonctionnement et d'évaluation des performances des systèmes irrigués ; il présente une revue bibliographique qui a été à l'origine du choix du cadre d'analyse et des méthodes adoptés pour mener ce travail de recherche. Le deuxième chapitre vise à comprendre l'espace oasien aride au-delà de son décor naturel. Il s'agit d'une première analyse d'ensemble des composantes d'un système irrigué fortement anthropisé et soumis à des contraintes climatiques, environnementales et sociales. Le troisième chapitre consiste à identifier les principales contraintes et leur relation de causalité. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur la confrontation du diagnostic d'ingénieurs entrepris lors de la modernisation de l'oasis avec le discours, les perceptions et les pratiques des agriculteurs. Le quatrième chapitre consiste à construire un cadre conceptuel d'évaluation. Cette formalisation conceptuelle du fonctionnement constitue la passerelle vers une évaluation quantitative dans la partie B. L'objectif de cette partie est l'évaluation des pratiques et des performances des agriculteurs sous contraintes environnementales en termes d'irrigation, d'engorgement et de salinité. Le chapitre 5 traite ainsi de la performance individuelle et collective de l'irrigation, et le chapitre 6 des performances du palmier dattier sous contraintes abiotiques en interaction. La conclusion porte sur la validité et les limites de l'approche proposée et propose des perspectives de recherche pour mieux analyser et comprendre les milieux oasiens mais plus largement les systèmes irrigués collectifs.

Chapitre 1 : Approches d'étude des périmètres irrigués, problématique et objectifs de la thèse

*« Ombre
si tu ne vas pas toujours avec l'Eau
- le Rocher se moque bien de tout ça -
l'Eau va avec l'Ombre
de l'Arbre qu'elle a favorisé
dont elle a inspiré chaque Fibre
convoqué chaque Feuille à la chaleur du Grand Air ».
Le signe de l'aride
R. Christin (2000)*

Dans ce chapitre nous proposons une synthèse bibliographique pour replacer l'analyse d'un périmètre irrigué collectif oasien dans son contexte disciplinaire, et justifier une approche interdisciplinaire nous permettant une analyse plus pertinente de notre problématique. Nous présentons dans un premier temps les méthodes d'analyse et leurs contraintes pour l'analyse des systèmes irrigués collectifs. Nous exposons dans un second temps la problématique, les objectifs et la démarche suivie dans cette étude.

1.1 Approches méthodologiques d'étude des performances des systèmes irrigués collectifs

Diverses approches ont été proposées pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes irrigués. Ces approches diffèrent en fonction de leurs objectifs, leurs méthodologies et les données requises (Dedrick et al., 2000). Dans les périmètres irrigués collectifs, l'amélioration des performances dépend en premier lieu de l'amélioration de la gestion de l'eau en combinant à la fois des aspects technico-agronomiques, socio-économiques et organisationnels (Clemmens et al., 2000).

La gestion des systèmes irrigués collectifs peut être définie comme un 'construit' complexe ayant plusieurs dimensions constitutives. Nous allons d'abord analyser individuellement les fondements et les limites de chacune de ces dimensions. Cette analyse bibliographique n'est pas exhaustive, la richesse des concepts et des outils établis autour de la notion de performance d'un système irrigué ne nous permet ici que d'en donner un bref aperçu. Nous avons orienté cet aperçu vers l'identification des limitations des différentes approches d'étude. Nous parlerons ici des performances et pas de la performance, en rapport avec la performance hydraulique (irrigation),

performance environnementale (salinité et engorgement) et performance agronomique (cultures irriguées).

1.1.1 Les approches biophysiques des performances

Les approches hydrauliques et agronomiques, qualifiées d'approches normatives ou '*engineering-research approaches*' ou encore '*top-down approaches*' sont dominantes dans la littérature scientifique. Ces approches sont les plus anciennes dans la mesure où la gestion de l'irrigation nécessite tout d'abord la conception des réseaux d'irrigation et de drainage et l'estimation des besoins des cultures qui relèvent des compétences des spécialistes en génie rural et en agronomie.

1.1.1.1 Performance hydraulique

Les superficies irriguées ont connu un développement spectaculaire au cours du siècle dernier, principalement sous la forme de périmètres de grande hydraulique (eg. barrage de Markala à Office du Niger au Mali, Barrage d'Assouan à la Vallée du Nil en Egypte, les bassins des rivières Amu Darya et Syr Darya (grands affluents de la mer d'Aral), Bassin de la Narmada en Inde, Tadla et Gharb au Maroc, vallée de la Medjerda en Tunisie, ...). Ce développement a été marqué par la forte intervention des Etats dans la construction, la maintenance et la gestion des aménagements hydro-agricoles, notamment les forages, les barrages et les réseaux d'irrigation et de drainage.

L'aspect technique a fortement marqué le développement de l'irrigation qui a été longtemps assimilée à l'hydraulique et au génie rural d'une façon générale (Jamin et al., 2005), en rapport avec la mise en œuvre de réseaux techniques pour la mobilisation, le transport, le partage, l'application, et l'évacuation de l'eau, mais aussi dans la maintenance et la réhabilitation des réseaux souvent pilotés directement par l'Etat. Le fonctionnement de ces aménagements est ainsi considéré comme étant en relation avec la circulation de l'eau dans les différents réseaux et conduites mais aussi dans le sol (Barreteau, 1998). Un des objectifs majeurs de dimensionnement des réseaux d'irrigation dans les périmètres collectifs consiste à satisfaire la demande en eau en période de pointe (Clément, 1966 ; Lamaddalena & Sagardoy, 2000). Cependant, de telles approches ont négligé le poids du système d'irrigation individuel à la parcelle (D'Urso et al., 1996 ; Zapata et al., 2007). De plus, l'évaluation de la performance de l'irrigation a été souvent réduite aux performances hydrauliques (e.g. Burt et al., 1997 ; Isodoro et al., 2004 ; Bekele & Tilahun, 2006). De l'échelle de l'aménagement à celle de la parcelle, elle s'appuie sur des

indicateurs d'efficience de distribution et d'application ou autres aspects techniques (e.g. Bos & Nugteren, 1990 ; Molden & Gates, 1990 ; Pereira, 1999 ; Playán et al., 2000 ; Horst et al., 2005 ; Sharhrokhnia & Avan, 2005 ; Juana et al., 2007 ; Pereira et al., 2007 ; Zapata et al., 2007). Ainsi, le modèle d'aménagement visant à optimiser l'utilisation technique de l'eau et de l'espace a été la règle de gestion de cette vision « techniciste » de l'irrigation.

1.1.1.2 Performance agronomique

Les travaux de l'agronome quant à eux trouvent leur origine dans la maîtrise agricole de l'eau ayant pour objectif d'optimiser la satisfaction des besoins en eau des cultures irriguées (Fontenelle, 2004). Ainsi, l'agronome raisonne à la parcelle cultivée et aborde l'irrigation comme n'importe quelle autre pratique culturale que l'agriculteur est amené à gérer (Sabatier & Ruf, 1992 cité par Fontenelle, 2004).

L'agronomie s'est construite autour de trois principaux axes de questionnement. Un premier axe conventionnel où la vision de l'agronome s'est concentrée sur l'étude des relations eau-plante-climat et la productivité de l'eau (e.g. Sarma & Rao, 1997 ; Singh et al., 2006 ; Lorite et al., 2007 ; Phengphaengsy & Okudaira, 2008). De plus, et à la différence de la science hydraulique qui est restée positionnée sur une approche purement technique, l'agronomie a cherché dans un deuxième axe à appréhender de plus en plus la complexité à la fois des pratiques et des savoirs faire agricoles mis en œuvre par l'agriculteur, mais aussi les contraintes et problèmes auxquels il pouvait être confronté (Fontenelle, 2004). Et finalement et à partir des années 70, les chercheurs ont commencé l'intégration de certains facteurs environnementaux pour expliquer les rendements (Lecomte, 2005) et évaluer l'influence des contraintes abiotiques sur les cultures. La majorité de ces travaux ont été orientés vers l'étude empirique de l'impact de la salinité ou de la sensibilité des cultures (e.g. Maas & Hoffman, 1976 et 1977 ; Bernstein, 1981 ; Ayers & Westcot, 1985 ; Datta et al., 1998 ; Casanova et al., 1999 ; Djili et al., 2003 ; ; Mehari et al., 2006 ; Ma et al., 2007), ou encore des mécanismes physiologiques d'adaptation des cultures à la salinité (Al Khayri, 2002 ; Karajeh et al., 2003 ; Maggio et al., 2005 ; Munns, 2005). Dans d'autres travaux, la salinité a été associée à l'engorgement (Ayars et al., 1999 ; Datta et al., 2002), ou au stress hydrique et à leur effet sur la performance des cultures comme le maïs, le melon, la tomate, l'ognon, le palmier dattier ou le chou (Shani & Dudley, 2001 ; Maggio et al., 2005 ; Shani et al., 2007). Mais la plupart des relations ont été établies dans des milieux contrôlés (Shani & Dudley, 2001 ; Shani et al., 2007 ; Tripler et al., 2007). Dans le milieu réel, d'autres facteurs environnementaux, agronomiques, socio-économiques en interaction sont aussi susceptibles

d'influencer la performance des cultures et les relations sont beaucoup plus complexes que celles établies en milieu contrôlé.

1.1.1.3 Performance environnementale

L'histoire ancienne témoigne du déclin de certaines civilisations anciennes fondées sur l'agriculture irriguée, e.g. la Mésopotamie (actuel Iraq), vallée de Viru sur la côte du Pérou, le Delta du Nil en Egypte, les bassins des rivières Amu Darya et Syr Darya (Mer d'Aral), Uttar Pradesh en Inde (Umali, 1993, Ochs & Plusquellec, 2003), et montre que la durabilité des périmètres irrigués a souvent été la conséquence d'une gestion déficiente de l'irrigation, de la salinité et du drainage. Cette menace est plus marquée dans les zones à déficit climatique important (Kara & Willardson, 2006). Le phénomène de salinisation a principalement été associé à la remontée d'une nappe créée suite à l'introduction de l'irrigation (Kuper & Habib, 2002). Il en découle ainsi que les causes de la salinisation ont longtemps été assimilées à la faible efficacité des réseaux d'irrigation et de drainage. Les approches classiques proposent donc des règles de dimensionnement de ces réseaux (Bouwer, 1969 ; Christen et al., 2001 ; van der Molen et al., 2007) ou s'appliquent à évaluer les risques de salinisation des sols dans différents contextes (e.g. Rhoades, 1980 ; Heikal & Al-Awajy, 1989 ; Misak et al., 1997 ; Rhoades et al. 1997 ; Luedeling et al., 2005). Récemment, les systèmes d'information géographique et la télédétection ont été mis au service des systèmes irrigués pour étudier l'étendue du phénomène de salinisation (e.g. Vidal et al., 1997 ; Tabet, 1999 ; Khan et al., 2005). Néanmoins, ces approches sont généralement basées sur des protocoles de terrains lourds et coûteux. De plus, elles ne se sont pas suffisamment intéressées aux processus d'adaptation des agriculteurs.

1.1.2 Performance sociale et organisationnelle

Vu la complexité des systèmes irrigués, et ce d'autant plus lorsque les ressources en eau et en sol sont partagées par les usagers, les approches biophysiques touchent à leurs limites dans l'étude des différents rapports entre ces usagers et leurs effets sur le fonctionnement des systèmes irrigués collectifs. Les approches sociales se sont alors développées pour combler ce déficit. Dans ces approches, l'irrigation n'est pas simplement un moyen de production dont chacun bénéficie individuellement mais plutôt 'un construit social' sous forme de règles collectives à travers lesquelles peuvent se comprendre les dysfonctionnements de la gestion de l'irrigation (Sabatier & Ruf, 1995 ; Aubriot, 2000 ; Fontenelle, 2004). Mais ces règles sont souvent en contradiction avec les stratégies et les comportements individuels (Fayssse, 2005 ; Ghazouani et al., 2009). Le résultat de ces contradictions détermine la diversité de performances des exploitations, ou encore

des situations d'iniquité entre agriculteurs, et la durabilité des systèmes irrigués (Brewer et al., 1997 ; Zardari & Cordery, 2009). Dans cette dimension sociale, l'eau est considérée comme un enjeu de pouvoir entre les agriculteurs et l'Etat, ou entre agriculteurs, à travers lequel se reflètent les rapports sociaux ; l'eau est 'le miroir de la société' (Baduel & Baduel, 1980 ; Bédoucha, 1987 ; Aubriot, 2000).

En plus de cette dimension sociale de l'irrigation, deux autres dimensions complémentaires ont été privilégiées dans la démarche d'analyse de la performance des systèmes irrigués collectifs (Ruf, 1984 et 1998 ; Clouet & Dollé, 1998) : la dimension historique définit les fondements des légitimités et des règles de gestion collective de l'irrigation dans la mesure où la situation reflète à la fois un contexte actuel mais aussi un héritage des orientations passées ; quant à la dimension territoriale, elle reflète les différentes conceptions des systèmes irrigués, en partant des pratiques locales des agriculteurs et en agrégeant progressivement les niveaux jusqu' au-delà des frontières des périmètres irrigués dans les circuits commerciaux. D'autre part, l'appartenance à un lignage donné marque fortement les anciens systèmes irrigués et la répartition spatiale des parcelles au sein de l'aménagement reflète souvent les rapports sociaux (Bédoucha, 1987 ; Brochier-Puig, 2000 ; Aubriot, 2004).

La gestion de l'irrigation requiert ainsi une organisation et une coordination (Le-Gal & Papy, 1998) que se soit des actions de construction, d'entretien, de gestion des aménagements hydro-agricoles ou de distribution de la ressource. La gestion de l'irrigation, dans ce qu'elle requiert de coordination et de régulation des comportements individuels des usagers, devient ainsi intrinsèquement liée à une structuration de la société (Uphoff, 1986). De plus, sa performance ainsi que les comportements individuels peuvent être reliés au statut foncier des exploitations (Li et al., 1998). Or, l'organisation collective peut se constituer librement sur le terrain pour résoudre les problèmes liés à la distribution de la ressource commune ou à l'entretien des réseaux collectifs, et ses membres sont généralement des personnages ayant une légitimité reconnue (grands exploitants, aînés, anciens,...) (Bédoucha, 1987 ; Bon, 2001). Pour acquérir un statut plus formel, l'organisation paysanne peut évoluer naturellement pour prendre une forme institutionnelle (Bon, 2001). Dans d'autres cas, la forme organisationnelle peut être imposée par les autorités centrales. Cette intervention externe peut générer des tensions et des conflits avant d'aboutir à un compromis acceptable par tous les usagers (Mathieu et al., 2001). Toutefois, elle peut parfois être à l'origine de menaces de la durabilité des systèmes irrigués (Brochier-Puig, 2004).

Nous pouvons déduire de cette analyse que les dimensions sociales, institutionnelles, culturelles, historiques, territoriales,... de l'irrigation ont aussi une influence considérable sur le fonctionnement d'un système irrigué collectif. Toutefois, ces approches réduisent aussi la complexité des systèmes collectifs à leur seule dimension sociale et ne peuvent ainsi répondre que partiellement aux enjeux actuels de l'agriculture irriguée dépendant de nombreux autres facteurs hydrauliques, agronomiques ou environnementaux.

1.1.3 Les dimensions transdisciplinaires et participative de l'irrigation

Ces approches sont nées du 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 collectifs. Les approches multidisciplinaires mobilisent et organisent les acquis de plusieurs disciplines, en particulier l'hydraulique, l'agronomie, l'économie, et des sciences sociales en fonction d'un objectif donné. Ainsi des approches de modélisation ont été utilisées pour étudier la sensibilité de 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 et les conditions de drainage, et les revenus de l'exploitation (Prathapar et al., 1997), ou alors dans la modélisation des dynamiques des bilans hydriques et salins selon une approche intégrée en mettant l'accent sur les dimensions hydrologiques, économiques, agricoles, et environnementales mais aussi sur les pratiques d'adaptation des agriculteurs (Khan & Hanjra, 2008). D'autres approches intégrées (e.g. Qureshi et al., 2002 ; Cai et al., 2003 ; Ragab et al., 2005) sont mises en oeuvre pour l'amélioration de la gestion des systèmes irrigués en intégrant plusieurs composantes de l'échelle de la parcelle à une plus grande échelle du bassin. D'autres approches notamment le 'benchmarking' ou 'analyse comparative' se sont progressivement affirmées. Ces approches 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 (e.g. Kloezen & Garcés-Restrepo, 1998 ; Kotb et al., 2000 ; Malano & Burton, 2001). D'autres affichent l'ambition d'évaluer les améliorations observées, d'identifier les contraintes et de mieux comprendre les déterminants de performance, dans l'espace et le temps (Burton et al., 2000). L'évaluation inclut, outre les aspects techniques et agronomiques, des aspects socioéconomiques, environnementaux et organisationnel (e.g. Bos et al., 1994 ; Clemmens et al., 2000 ; Bekele & Tilahun, 2006 ; Norman et al., 2008). L'évaluation peut aussi se baser sur des indicateurs d'adéquation, équité, fiabilité, flexibilité et durabilité (Bos et al., 2001 ; Gorantiwar & Smout,

2005). Les champs disciplinaires peuvent aller jusqu'à l'intégration des connaissances de psychologues, de spécialistes des sciences de gestion et de mathématiciens pour modéliser les comportements des agriculteurs mais aussi de la production (Willock et al., 1999).

Ces approches apportent des réponses pertinentes concernant le fonctionnement des systèmes irrigués. Néanmoins, la complexité des relations dans ces systèmes rendent cette analyse multidisciplinaire lourde et coûteuse. D'autant plus que ces approches négligent les acteurs des systèmes irrigués et principalement l'agriculteur, ses pratiques et ses stratégies. En agissant ainsi, les approches multidisciplinaires n'abordent pas la complexité des problèmes de l'irrigation qui se posent à l'agriculteur lorsque ce dernier doit intégrer dans ses choix un ensemble de contraintes liées à son environnement physique et aux règles collectives à respecter. D'où la naissance des '*local bottom-up participatory approaches*' ou approches participatives. Différents concepts, sont alors nés, comme 'Participatory Rural Appraisal (PRA)', 'Participatory Learning and Action (PLA)', 'Objective-Oriented Participatory Planning (OOPP)', 'Social Learning' où les acteurs prennent de plus en plus de poids dans les processus de dialogue, la définition des programmes d'action, et l'évaluation des performances des projets de développement (e.g., Chambers, 1994 ; Dedrick et al., 2000 ; Clemmens et al., 2000 ; McDaniels & Gregory, 2004 ; van der Schans & Lempérière, 2006 ; Toderi et al., 2007). A la différence des précédentes approches où l'évaluation est principalement effectuée par des spécialistes, ces approches participatives sont essentiellement basées sur le savoir-faire local et la perception des usagers (Desbiez et al., 2004 ; Pahl-Wostl, 2005 ; Vicente & Partidario, 2006 ; Toderi et al., 2007). En effet, la perception des agriculteurs est basée sur un savoir-faire issu de l'héritage d'une connaissance et d'ingéniosité qui peuvent remonter à plusieurs siècles de pratique et de mode de gestion et reflètent ainsi leur relation directe avec leur environnement (Ali, 2003). Les avantages, les risques et leur capacité adaptative dépendent aussi de leurs ressources mais aussi du degré d'appui institutionnel (Boesen & Friis-Hansen, 2001 ; Diederer et al., 2003). La perception peut aussi être influencée par des facteurs psychologiques, sociaux et culturels incluant des aspects subjectifs et objectifs (Luyet, 2005). Finalement, la perception des agriculteurs peut être assimilée à un modèle mental qui agit comme un filtre à travers lequel la situation est observée (Kolkman et al., 2007). Toutefois, il est possible que les approches participatives inhibent différents points de vue individuels et ainsi la diversité et la richesse des informations recueillies (Orr & Ritchie, 2004), quand la réussite de l'analyse nécessite de capturer la diversité exprimée dans les propres termes des agriculteurs, et de développer ensuite une analyse par l'agrégation des différents points de vue individuels et la perception des liens de causalités (Haw et al., 2000 ; Blackstock et

al., 2007). Les approches participatives ont ainsi leurs propres limitations et requièrent une compréhension du contexte de la perception et une analyse critique (Smith, 2008).

1.1.4 Conclusion

De nombreux travaux ont donc été conduits pour étudier les performances des systèmes irrigués selon des approches monodisciplinaires ou multi (ou encore inter) disciplinaires. Or chaque approche a ses intérêts mais aussi ses limites. Ainsi, les *approches normatives* d'ingénierie et d'agronomie ont abordé la problématique avec un raisonnement rationalisé limité à l'aspect technico-agronomique de l'irrigation. Or, la dimension de l'irrigation est beaucoup plus large et intègre des dimensions socioculturelles et organisationnelles liées au partage des ressources communes en eau et en sol et à l'histoire qui définit bien souvent les fondements des légitimités et des règles de partage. Quant aux *approches participatives*, elles ont pris en compte les dimensions socioculturelles et organisationnelles non prises en compte dans les approches normatives. Dans ces approches, les acteurs prennent de plus en plus de poids dans les processus de dialogue, dans la définition des programmes d'action et dans l'évaluation des performances des projets de développement. Toutefois les approches normatives ont aussi leurs propres inconvénients. L'une de leurs principales limitations est qu'elles se fient souvent au discours des acteurs sans une confrontation de leurs discours avec leurs pratiques mais aussi sans une analyse objective des perceptions et des pratiques d'adaptation des agriculteurs aux différentes contraintes.

Il en découle de cette analyse bibliographique que toute amélioration des performances des systèmes irrigués est rendue difficile sans la mise en œuvre d'une démarche conciliant à la fois les différentes dimensions constitutives du système à savoir les dimensions technico-hydraulique, agronomique, environnementale, et historique et où les perceptions, les pratiques et les stratégies des agriculteurs trouveront leur place.

1.2 Problématique et objectifs

1.2.1 Problématique générale

Dans ce contexte aussi marqué par la pression sur les ressources en eau et en sol et la remise en question de la durabilité de l'irrigation, l'amélioration de la productivité des ressources utilisées est devenue une priorité à l'échelle internationale comme à l'échelle nationale. Dans cette perspective, la prise en compte de l'ensemble des facteurs déterminant les performances des systèmes irrigués devient incontournable. Cependant, la recherche sur la gestion des systèmes

irrigués collectifs ne nous offre pas un tel cadre d'analyse du fait des deux principaux inconvénients : (i) la mise en œuvre repose sur un savoir de spécialistes en relation avec des thématiques spécifiques comme en hydraulique, agronomie, ou sociologie, où les méthodes s'élaborent à partir d'une rationalité limitée alors que la performance du système dépend d'un ensemble de dimensions en interaction ; et (ii) elle ne permet pas l'identification et la hiérarchisation des principaux facteurs explicatifs des baisses de performances observées, ce qui serait nécessaire afin de spécifier les priorités d'intervention. Obtenir de telle information impose des investigations spécifiques dont la réalisation reste généralement lourde et coûteuse. Un questionnement sur la démarche à suivre et la méthodologie à appliquer dans de tels systèmes est nécessaire afin de spécifier les priorités d'intervention dans une double démarche de développement et d'accompagnement des agriculteurs afin d'améliorer la productivité des ressources en eau et en sol et de garantir la réussite des plans d'actions.

1.2.2 Objectif global de la thèse

La problématique de l'agriculture dans les régions arides et semi-arides est centrée sur la durabilité des systèmes irrigués collectifs. De plus, un décalage entre les performances réelles et celles attendues persiste souvent malgré les efforts d'améliorations techniques en matière d'irrigation et de drainage. La dégradation des performances reste un problème majeur auquel se heurtent les gestionnaires d'autant plus que les causes effectives de ces dégradations ne sont pas explicitement identifiées. *Proposer une démarche méthodologique pour identifier les facteurs limitants et évaluer leur impact*, tel est l'enjeu de cette étude, appliquée à une oasis représentative de la complexité de la gestion de l'irrigation et de la dégradation des performances.

La prise en compte de l'ensemble des limitations méthodologiques évoquées ci-dessus nous a conduits à adopter une approche interdisciplinaire un peu spécifique c.-à-d. à mi-chemin entre les approches normatives et les approches interdisciplinaires participatives. L'objectif principal de notre travail de recherche s'inscrit dans ce cadre. Il s'agit du *développement de méthodes d'analyse du fonctionnement et d'évaluation des performances d'un périmètre irrigué collectif*. Nous avons en même temps cherché à rendre cette démarche méthodologique simple, pertinente et rapide à mettre en œuvre. Ainsi, pour être pratique, rapide et reproductible, la démarche suivie devait être suffisamment structurée, intégrer l'ensemble des déterminants susceptible d'agir sur les performances du périmètre collectif irrigué, mais aussi se baser sur des données facilement accessibles afin de faciliter l'évaluation de la performance des différentes composantes du système. Trois principales questions se posent alors : *Comment identifier ces facteurs et leurs*

interactions ? Comment les renseigner d'une manière rapide mais efficace et pertinente ? Et finalement comment évaluer leurs effets sur les performances du système ?

1.2.3 Objectifs scientifiques et finalisés

Dans un cadre d'analyse du fonctionnement et d'évaluation des performances d'un périmètre irrigué collectif orienté vers l'amélioration de la productivité des ressources en eau et en sol, les principaux objectifs sont :

- Contribuer à l'élaboration d'une méthode de diagnostic permettant de refléter à la fois la réalité et la complexité de la gestion d'un périmètre irrigué collectif. La réflexion portera dans un premier temps sur les méthodes d'analyse du fonctionnement afin d'identifier les principales contraintes et leur relation de causalité. La démarche consiste à confronter les diagnostics d'ingénieur établis lors de la modernisation de l'oasis et le discours, les perceptions et les pratiques des agriculteurs ;
- De cette analyse ressortent deux questions prioritaires qui ont orientées nos travaux de recherche vers :
 - (i) la compréhension de la gestion individuelle et collective de l'irrigation dans le périmètre oasien de Fatnassa et l'identification des stratégies et des pratiques individuelles ayant des effets, positifs ou négatifs, sur le respect de la règle collective ;
 - (ii) la mise en évidence de l'influence réelle de chacune des contraintes d'irrigation, de salinité et d'engorgement qui déterminent à la fois les pratiques des agriculteurs (adaptation), les performances des systèmes de culture (effet), et plus globalement la durabilité des aménagements hydro-agricoles (impact). Elle laissera une large place aux pratiques d'adaptation des agriculteurs confrontés depuis longtemps à ces contraintes ;
- Contribuer à l'analyse de la durabilité de ces systèmes irrigués par l'intégration des différentes composantes techniques, agronomiques, sociales et organisationnelles. Elle s'adresse plus particulièrement au paradoxe existant entre des politiques publiques de sécurisation de l'approvisionnement en eau et d'amélioration de l'efficacité du drainage pour une meilleure valorisation des ressources en eau et sol, et les stratégies foncières d'extension des superficies mises en œuvre par la majorité des agriculteurs.

A chacune des étapes, un intérêt particulier est porté à la diversité des pratiques et des stratégies paysannes.

Différentes questions d'ordre méthodologique se posent alors :

- Comment identifier les contraintes, leurs causes, leurs conséquences sur les performances du système irrigué à deux échelles, parcelle et aménagement ? Comment mettre en évidence les pratiques mises en œuvre par les agriculteurs pour faire face à ces contraintes ? Comment mettre en évidence les perceptions des agriculteurs et leurs stratégies individuelles dans le cadre d'une démarche d'analyse diagnostic ? Un intérêt particulier sera consacré à la perception des contraintes liées à la gestion de l'irrigation et aux règles collectives, à l'engorgement, et à la salinité ;
- Comment évaluer les performances de la gestion individuelle et collective des eaux et des terres, et leurs déterminants, dans le cadre d'une approche interdisciplinaire prenant en compte les facteurs environnementaux, techniques, sociaux, organisationnels, mais aussi les pratiques et les stratégies individuelles ? Quelles méthodes pour la sélection des variables et l'élaboration d'indicateurs ? Quelles méthodes de gestion et d'exploitation de l'information ? Un intérêt particulier sera consacré aux performances individuelles et collectives de l'irrigation dans l'oasis de Fatnassa.
- Comment évaluer la performance du palmier dattier et ses déterminants dans le cadre d'une approche interdisciplinaire prenant en compte les facteurs environnementaux, techniques, sociaux mais aussi les pratiques et stratégies individuelles ? Quelles méthodes pour la sélection des variables et l'élaboration d'indicateurs ? Quelles méthodes de gestion et d'exploitation de l'information ? Un intérêt particulier sera consacré à l'étude du milieu physique en interaction avec les pratiques et les stratégies des agriculteurs et à l'évaluation des performances du palmier dattier dans un milieu non contrôlé.

A chaque étape de la démarche se posent un certain nombre de questions génériques :

- Comment mobiliser les outils et méthodes des différentes disciplines scientifiques concernées pour l'étude d'un tel système complexe et fortement anthropisé ?
- Comment représenter et valider les résultats basés sur la perception des agriculteurs ?
- Comment intégrer les deux échelles de la parcelle et de l'aménagement en interaction ?
- Comment intégrer les contraintes du milieu physique en interaction entre-elles mais aussi en interaction avec les pratiques et les stratégies des agriculteurs ?

Notre stratégie est de confronter les résultats issus d'une démarche 'qualitative' d'analyse-diagnostic avec ceux issus d'une démarche 'quantitative' d'évaluation afin de définir une démarche de développement et d'accompagnement des agriculteurs pour garantir la réussite des plans d'actions.

1.2.4 Positionnement et choix techniques

Pour aborder la complexité de la gestion de l'irrigation et la multiplicité des facteurs et des interactions déterminant les performances dans les périmètres irrigués collectifs, nous avons choisi un positionnement à mi-chemin entre trois champs disciplinaires pour cadrer notre démarche d'analyse du fonctionnement et d'évaluation des performances.

Nous avons sollicité l'hydraulique agricole pour caractériser les aménagements hydro-agricoles. En fait, la compréhension du fonctionnement de la gestion de l'irrigation nécessite le développement d'une approche technique permettant d'aborder l'irrigation depuis la mobilisation de l'eau pour l'ensemble d'un périmètre jusqu'à son application au niveau de chaque parcelle élémentaire à travers la caractérisation d'un dispositif technique des aménagements hydro-agricoles. D'une façon complémentaire, nous avons caractérisé l'interaction du trio irrigation-salinité-engorgement.

Nous avons sollicité l'agronomie pour caractériser les performances des cultures irriguées. Il s'agit également de comprendre la complexité à la fois des pratiques et des savoirs faire agricoles mis en œuvre par l'agriculteur, mais aussi les contraintes et problèmes auxquels il pouvait être confronté. Cette dimension nous a aidés à comprendre comment l'agriculteur procède dans la mise en valeur des ressources en eau et en sol et quels moyens met-il en œuvre. La conduite de l'irrigation et les contraintes environnementales (salinité du sol et de la nappe, engorgement) en interaction, ainsi que la conduite des plantations et le degré d'intensification et certaines pratiques des agriculteurs (comme les amendements sableux) ont été abordés comme les déterminants clés des performances de la principale culture irriguée, le palmier dattier.

Ensuite, la prise en compte des dimensions sociales et historique de l'agriculture et de la gestion de l'irrigation, nous a permis d'aborder l'organisation collective et les comportements individuels autour de la gestion des ressources partagées. La gestion de l'irrigation requiert notamment que soient identifiées et décrites l'organisation des règles de gestion avec leur dimension historique ayant été créées à la base pour garantir un partage équitable des ressources.

Enfin, nous avons emprunté la notion de perception aux approches participatives. Toutefois, dans notre démarche nous sommes allés plus loin que le simple discours de l'agriculteur dans une confrontation des perceptions des agriculteurs avec leurs pratiques d'adaptation aux contraintes environnementales et leurs stratégies pour évaluer leur effet sur les performances du système et leur impact sur sa durabilité mais aussi afin de comprendre la logique d'action des agriculteurs.

Nous avons choisi quatre modes complémentaires de recueil de données : des enquêtes semi-directives, des mesures de terrain complétées par des analyses au laboratoire, des observations de terrain, et des données disponibles au niveau du questionnaire de l'aménagement. La cartographie numérique a aussi été mise en œuvre pour caractériser certaines variables ayant une structure spatiale au sein du périmètre irrigué.

Il est aussi nécessaire de spécifier les échelles de temps et d'espace. L'échelle de temps choisie est celle de l'année agricole. Cette échelle est jugée suffisante pour caractériser les relations entre les variables mais aussi pour caractériser les pratiques des agriculteurs et leurs conséquences à la fois sur l'irrigation et sur la performance des cultures irriguées. Quant à l'échelle spatiale choisie, il s'agit de la parcelle élémentaire en interaction avec l'ensemble des parcelles du fait que l'irrigation est organisée dans un système rotationnel. La taille de l'oasis et la diversité des pratiques des agriculteurs nous a permis d'explorer ces deux niveaux d'échelle.

La mobilisation des champs disciplinaires différents et complémentaires, et des outils différents nous ont permis d'aborder la complexité du fonctionnement dans un périmètre collectif irrigué au sud tunisien, d'engager une réflexion sur la durabilité, et d'identifier les voies d'actions possibles pour une meilleure valorisation des ressources en eau et en terre dans les oasis du sud-tunisien.

1.2.5 Démarche suivie

L'enjeu de notre travail est ainsi de pouvoir définir une méthodologie interdisciplinaire d'analyse et d'évaluation. Après une présentation détaillée de la zone d'étude, les résultats ont été présentés en quatre parties :

Nous avons tout d'abord défini une méthode de diagnostic subjectif qui tient en compte à la fois les facteurs techniques d'irrigation, les facteurs du milieu physique (la nappe, le sol), la gestion individuelle et collective de l'irrigation, et les discours et les pratiques d'adaptation des agriculteurs. Décrire avec une précision suffisante les contraintes et les relations de causalités semble donc indispensable pour comprendre ce qui cause les variations des performances mais aussi pour mieux connaître la sensibilité du système. Ces exigences peuvent être satisfaites par la confrontation du diagnostic d'ingénieurs entrepris lors de la modernisation de l'aménagement au discours, perceptions et pratiques des agriculteurs et d'en évaluer leur pertinence face à l'identification des contraintes et à l'analyse des relations de causalité.

Dans une seconde partie, nous avons opté pour une formalisation conceptuelle de l'analyse diagnostic. Cette étape consiste en une grille d'analyse de la chaîne de causalité où nous nous

confronterons à une situation complexe où des dimensions techniques, environnementales, agronomiques et sociales interagissent fortement. De telles exigences peuvent être satisfaites par la représentation UML du fait que ce langage offre la possibilité de représenter non seulement des objets physiques et non physiques mais aussi leurs relations. Les variables retenues, l'acquisition et la validation des données est une étape cruciale pour la suite.

Dans les troisièmes et quatrièmes parties, il s'agit enfin d'une évaluation quantitative des différentes interactions via une approche méthodologique objective dont la mise en œuvre soit simple et reproductible, et qui permette de caractériser le milieu par autant de variables quantitatives ou qualitatives qu'il y a de facteurs limitants. Cette méthode doit prendre en compte a priori tous les facteurs limitants possibles, elle doit choisir ceux qui sont réellement explicatifs des performances, et d'estimer leur effet sur les composantes affectées. De telles exigences peuvent être satisfaites en utilisant des analyses statistiques appropriées. Nous avons choisi d'analyser les deux principales composantes du système oasien à savoir la durée du tour d'eau (troisième partie) et la production de dattes, en quantité et en qualité (quatrième partie). Pour ce faire, une batterie d'indicateurs, simples ou complexes, a été développée. Toutes les relations et interrelations se sont ainsi passer au crible d'une grille d'interprétation cohérente rendue possible grâce à la conceptualisation du fonctionnement et la mise en relation de toutes les variables de différentes natures à caractère technique, agronomique, environnemental, et social. Des recommandations pour améliorer la performance de la gestion de l'irrigation et la performance du palmier dattier peuvent être tirées de cette évaluation.

*Partie A L'Eau, le sel et la terre : Identification des
contraintes & Mise en place d'un système d'évaluation des
performances*

Chapitre 2 : Un cas d'étude des oasis du Nefzaoua : une longue et riche histoire vs. une situation actuelle préoccupante

« Du grand Chott El Djérid la méharée fendait

...

Entre ce lac salé et ces vagues figées,
l'ironie du destin a voulu l'abondance.
Une source jaillit qui prodigue la vie ».

Contrastes

D. Malassis (2000)

Le Nefzaoua constitue la zone d'étude. Les critères qui ont mené à ce choix sont : l'importance des surfaces des oasis et des productions de palmier dattier qu'il présente, sa représentativité de la problématique socioéconomique et environnementale du sud tunisien, et l'existence de données d'études en dehors de cette thèse. Dans ce chapitre, la première partie décrit le contexte régional du Nefzaoua, et la seconde décrit le site d'étude et le situe dans son contexte régional.

2.1 La région du Nefzaoua : historique, enjeux et défis

Un article scientifique (Mekki et al., 2009) dans lequel nous analysons l'agro-système oasien du Nefzaoua à partir des études et des statistiques sur la région en intégrant les aspects biophysiques et socioéconomiques dans un cadre conceptuel a été soumis à la revue « Regional environmental change ». Dans ce mémoire nous présentons une description sommaire de ce système.

2.1.1 Historique et importance socio-économique

Depuis les temps les plus reculés de l'histoire, des sources artésiennes ont permis le développement d'une agriculture oasienne pérenne sans aucune autre pareille en Tunisie. Les systèmes traditionnels de production oasienne étaient basés sur un aménagement hydraulique ingénieux, des règles de gestion des ressources foncières et hydriques basés sur des droits d'eau ancestraux, l'étagement des cultures et la diversification des variétés du palmier dattier (Battesti, 2005). La gestion collective de l'irrigation dans les oasis est une tradition ancestrale basée sur une organisation ingénieuse développée depuis le XIII^e siècle par *Ibn Chabat*. Les droits d'eau sont exprimés en nombre de clepsydre localement appelé '*gadous*', et l'aiguadier, '*Goddas*', avait acquis une autorité coutumière lui permettant de faire respecter les droits d'eau (Baduel & Baduel, 1980 ; Bédoucha, 1987). En matière de drainage, les oasiens le considéraient comme le complément indispensable de l'irrigation et les oasis étaient drainées par des canaux à ciel ouvert localement appelés '*Khnadeq*'. Ces canaux étaient creusés, à une profondeur moyenne de 1.5 à

2.5 m, et entretenus par l'ensemble de la communauté oasienne. L'ingéniosité de ces réseaux réside dans le fait que leur écartement répondait correctement aux exigences de l'hydraulique souterraine (en milieu saturé dans les sols à perméabilité élevée et en régime transitoire) (Ennabli, 1993). Toutefois, la richesse des techniques hydrauliques et leur extrême ingéniosité masquaient la grande fragilité des systèmes oasiens et l'effet de l'extrême aridité du climat (Kassah, 1998).

Dans ces systèmes oasien, la culture du palmier dattier jouait un rôle socio-économique important dans la subsistance et dans la fixation des nomades (Sghaier, 1995 ; Kassah, 1996). Au cours de la période de prospérité de la fin du XVIIe siècle, l'organisation du système de culture agricole en trois strates de couverture végétale et l'équilibre des rapports entre les oasis et l'extérieur ont permis le développement d'une économie hautement intégrée dans laquelle les activités extra-agricoles (artisanat, commerce) jouaient un rôle considérable. Des calamités de toutes sortes (famine, choléra, exactions fiscales des pouvoirs publics...) ont ensuite frappé la population tunisienne au XIXe siècle. Elles ont été l'amorce d'un processus de désintégration de l'économie oasienne dont l'équilibre a été totalement rompu à l'époque coloniale. Il s'est traduit par le développement de mouvements migratoires dès la fin du XIXe siècle, s'accroissant à partir des années 1930 (Belhedi, 1998 ; Kassab, 1980). La situation s'est encore dégradée avec le tarissement progressif des sources et des forages artésiens. Le processus migratoire a été interrompu dans les années 1970 suite au démarrage des travaux du Plan directeur des eaux du sud (PDES) pour la sauvegarde et la rénovation des anciennes oasis, et la création de nouvelles oasis dans les zones du Djérid et Nefzaoua (Kassah, 1996). Ces oasis deviennent alors le théâtre de transformations économiques et sociales importantes en réponse à une demande croissante de l'exportation de dattes (Bou Ali, 1988).

Le secteur du palmier dattier forme le pilier de l'économie actuelle de la région du Sud. La production nationale de dattes est passée de 80,000 tonnes en 1995 à 135,000 tonnes en 2006. La région du Nefzaoua contribue à la moitié de la production totale du pays. Le contexte économique actuel favorise la monovariété de dattes Deglet Nour qui représentait 45 % en 1977 pour atteindre 60% des effectifs de palmiers en 2002. Actuellement la production des dattes Deglet Nour représente près de 80% de la production totale du Nefzaoua (MARH & GIF, 2007 ; FAOSTAT, 2009). D'une superficie totale de 22,900 Km², actuellement, la région du Nefzaoua couvre 48% de la superficie totale des oasis tunisiennes avec près de 15,600 ha de palmeraies (100 oasis) juxtaposant des paysages d'anciennes et nouvelles (publiques et privées) oasis du sud de la Tunisie (ONAGRI, 2001) (Fig. 2.1). En termes effectif, la région du Nefzaoua représente

47% des 4,155 millions de pieds dont 1,589 millions de pieds Deglet Nour (ONAGRI, 2001). Suite aux aléas climatiques, essentiellement les vents forts printaniers (pollinisation) et les pluies automnales (qualité de la récolte), la production des dattes Deglet Nour est très variable d'une année à l'autre. La production de dattes Deglet Nour a passé de 52,000 tonnes en 1998-99 à 40,000 tonnes en 2000-01 dans le Nefzaoua (MARH & GIF, 2007 ; FAOSTAT, 2009).

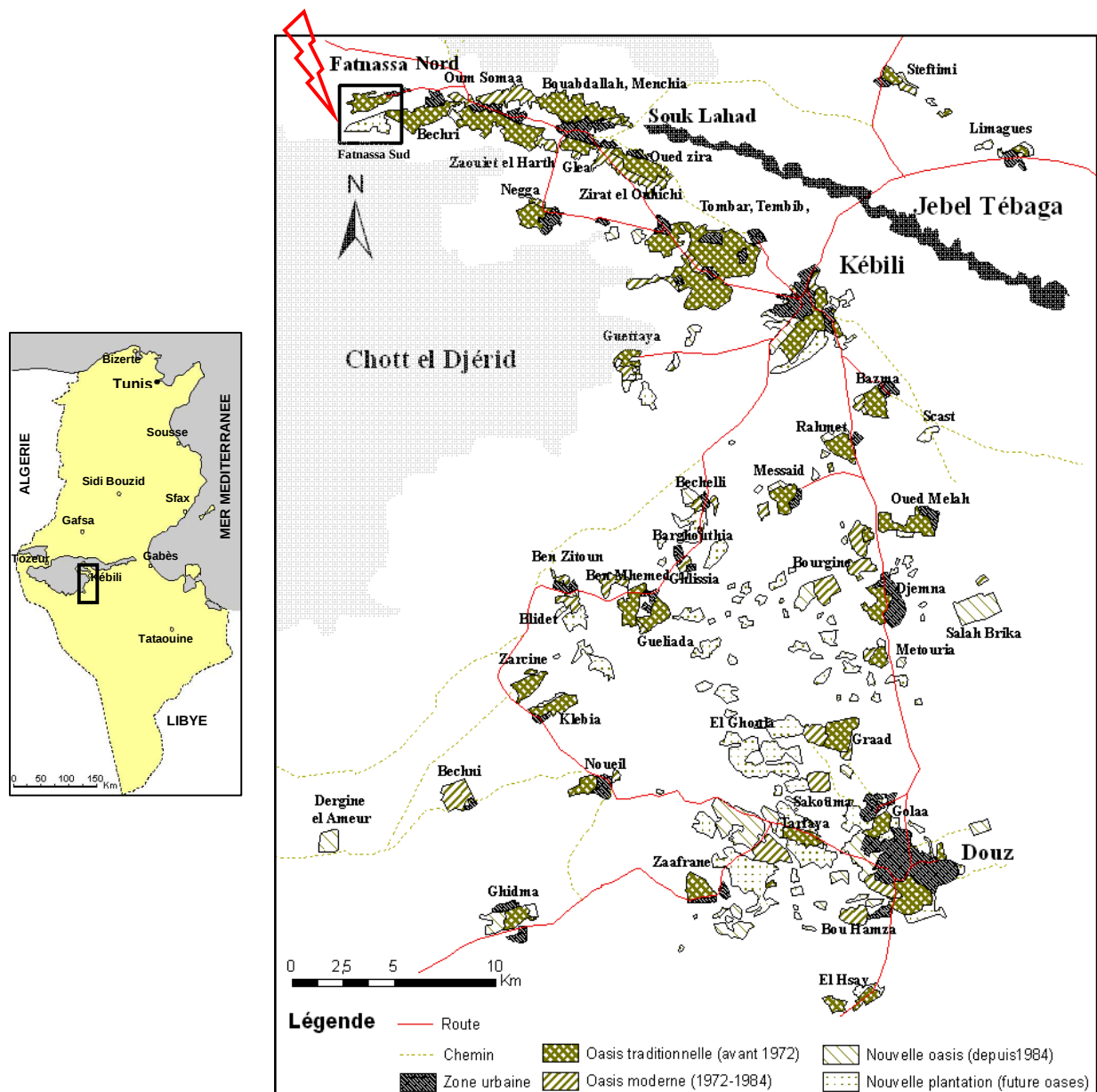


Figure 2.1 : Les oasis du Nefzaoua, et localisation de l'oasis de Fatnassa (Adaptée de Marini and Ongaro, 1988).

Le Nefzaoua correspond à la région délimitée par les coordonnées 33.30° et 34.15° latitude Nord et 8.30° et 9.10° longitude Est. Administrativement le Nefzaoua correspond au gouvernorat de

Kébili. Le Nefzaoua est limité vers le nord, nord est et l'est par un relief montagneux formé par le Jebel Tébagha et les monts de Matmata. Le Chott El Djérid contourne le Nefzaoua au Nord et à l'Ouest. Le Sud et le Sud Est du Nefzaoua sont limités par Sahara septentrional (Erg oriental).

2.1.2 Climat

La région du Nefzaoua est soumise à l'influence du climat continental, froid en hiver et chaud en été. Elle appartient à l'étage méditerranéen saharien, sous-étage supérieur à hiver froid. La saison chaude s'étale de juin à septembre est la saison chaude. Le mois de juin est le mois le plus chaud, la température moyenne atteint 31.8 °C et la moyenne des températures maximales est de 41.7 °C. La saison froide s'étale de décembre à février où la température moyenne ne dépasse pas 12 °C. Les pluies sont plus fréquentes pendant cette période. Contrairement à la saison sèche, la saison froide est caractérisée par une pluviométrie relativement abondante (92.4 mm.an⁻¹), un taux d'humidité assez élevé (52%), un faible pouvoir évaporatoire, et une température basse (Kadri & Ranst, 2002).

L'évapotranspiration est importante et estimée à 1,680 mm dans les oasis de Kébili (Sarfatti, 1988) quant au besoin annuel en eau d'irrigation est estimé à 1,578 mm, avec un maximum de 272 mm en août (Sanyu Consultants Inc., 1996).

La région de Nefzaoua subit l'influence des vents chauds (sirocco) du secteur ouest en été, des vents froids et sec du secteur Ouest et Nord-Ouest en hiver, et les vents de sable du secteur est et nord est au printemps. Ces derniers vents sont les plus fréquents (120 j.an⁻¹). La vitesse moyenne du vent dans cette région est de 1.45 m.s⁻¹.

2.1.3 Extension des surfaces irriguées et contraintes environnementales

Les oasis étaient alimentées par des sources d'eau artésiennes provenant des nappes souterraines hérités des derniers épisodes pluvieux du quaternaire. Toutefois, le débit des ces sources a commencé à diminuer aux années 50 jusqu'au tarissement complet (années 70). La disponibilité en eau d'irrigation devient alors un facteur essentiel au maintien de l'équilibre aussi fragile des systèmes de production oasiens. Les eaux ont un caractère fossile et sont de plus en plus rare ; s'ajoute à cette contrainte de disponibilité la gestion de l'eau. En effet, les interventions successives dans les oasis anciennes ont fragilisé le droit d'eau instauré depuis plusieurs siècles. Les règles collectives et les comportements individuels ne paraissent plus en mesure de garantir une productivité élevée de l'eau et de la terre.

Depuis les années 70, l'Etat aura consacré d'importants investissements dans le cadre du Plan Directeur des Eaux du Sud (PDES) pour la réalisation de nombreux forages. Ce projet visait une large allocation en ressources en eau à partir des deux aquifères du Complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI) par le remplacement des forages vétustes et la création de nouveaux forages. Il s'agit essentiellement de la sauvegarde de 136 oasis traditionnelles d'une superficie de 23,200 ha souffrant d'un déficit hydrique important, et de la création de 32 nouvelles oasis sur 4,700 ha dans les régions du Jérid (Tozeur) et Nefzaoua (Kébili), Gafsa et Gabès. Dans le Nefzaoua, le projet a été implémenté entre 1984 et 1995 dans 50 oasis traditionnelles de superficie 4,300 ha et dans 4 nouvelles oasis de 300 ha (Gharbi, 2009).

La nappe du CT, caractérisée par une profondeur de 80 à 400 m de, une eau froide et une salinité moyenne de 1.5 g.l^{-1} , a été graduellement exploitée, initialement la plupart des forages étaient artésiens, ensuite le mode d'exploitation a vite évolué au pompage à cause des prélèvements importants et la chute du niveau piézométrique. Par rapport à un potentiel exploitable estimé à $4.50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Sghaier, 2006), les prélèvements ont plus que septuplé de 1.4 à $10.5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ entre 1950 et 2002 et les prélèvements des forages 'illicites' ont passé de seulement $0.025 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en 1981 à $6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en 2002. Cette exploitation accrue du CT a provoqué un abaissement du niveau piézométrique dans la région du Nefzaoua de 1 m.an^{-1} durant ces trois dernières décennies (Mamou & Hlaimi, 1999). Cette surexploitation a provoqué l'augmentation de la salinité de l'eau, le rabattement des nappes et la disparition de l'artésianisme, et donc le recours de plus en plus important au pompage occasionnant l'accroissement des coûts d'exhaure et d'exploitation des ressources en eau. L'exploitation du CI (800 à 2,500 m de profondeur, température de l'eau supérieure à $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$) a commencé au début des années 80. La salinité de l'eau varie de 2 à 4 g.l^{-1} (El Fahem et al., 2004). La majorité des forages CI sont encore artésiens.

Récemment, l'Etat investit dans une stratégie nationale d'économie d'eau et d'amélioration de l'efficience du drainage dans le cadre du projet d'Amélioration des Périmètres Irrigués dans les Oasis du Sud (APIOS) afin de préserver les ressources en eau souterraine non renouvelables et de mieux valoriser les eaux utilisées mais aussi dans la lutte contre l'hydromorphie et la salinisation des sols (Al Atiri, 2005). Le projet a été implémenté depuis 1997 jusqu'à 2005 dans 88 oasis de superficie de 14,425 ha répartis sur 8 oasis de 3,467 ha à Gafsa, 20 oasis de 3,143 ha à Tozeur, 30 oasis de 4,115 ha à Gabès et 30 oasis de 3,700 ha à Kébili (Gharbi, 2009).

Malgré ces investissements réalisés, le déficit en eau est particulièrement marqué à cause d'extensions continues de nouvelles plantations qui empêchent systématiquement de résorber le

déficit dès que de nouveaux forages sont créés, en particulier sur la presqu'île de Kébili (Kassab, 1980). Les extensions privées se sont principalement faites à la faveur de nouveaux forages considérés comme 'illicites' et sont particulièrement nombreuses dans le Nefzaoua (7,000 ha). Quant aux extensions à la périphérie des anciennes oasis, elles se sont faites progressivement et sont de l'ordre de 1,000 ha dans le Nefzaoua (Kassab, 1996). La réalisation par l'Etat des forages profonds pour réduire le déficit en eau des anciennes oasis va permettre de détourner une partie de l'eau vers de nouvelles terres et l'irrigation de nouvelles plantations. Le tour d'eau ancestral se voit ainsi largement perturbé par ce processus. La réhabilitation des anciennes oasis a aussi été à l'origine d'une nouvelle différenciation sociale. Ceux qui disposent de revenus non agricoles ont réussi à investir dans la réalisation de forages 'illicites' et à entreprendre des extensions. En revanche, ceux qui ont peu de ressources possèdent de petites exploitations ou sont situés au centre de l'ancienne oasis ont du mal à s'adapter. C'est désormais dans le cadre de stratégies familiales de diversification des ressources et de pluriactivité que la reconduction d'une agriculture familiale rentable peut être assurée.

En plus du déficit persistant de l'irrigation, la surexploitation des eaux souterraines dans le sud tunisien représentent un des principaux enjeux du développement économique et social de ces régions dont la population reste encore essentiellement agricole (Kassab, 1998). De plus, ces oasis sont localement confrontées à une salinité élevée des eaux d'irrigation et à des manifestations d'engorgement et de salinité des oasis situées à proximité du Chott El Djérid, souvent accentuées par la faible efficacité des systèmes de drainage. D'autre part, le coût de la mobilisation de nouvelles ressources devient de plus en plus élevé. L'exploitation excessive, qui a induit l'abaissement des niveaux piézométriques et le recours au pompage, augmente ainsi le coût de l'exhaure.

2.2 L'oasis de Fatnassa, un système ancien largement anthropisé

L'oasis de Fatnassa est une oasis historique ayant hérité de tous les précédents changements qui ont touché la région du Nefzaoua. Ce site cadre de ce travail de thèse a été choisi par l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts depuis 2000 comme un terrain d'étude dans le cadre du programme de recherche PISA. Un réseau de piézomètres pour le suivi de la nappe superficielle et de la salinité des sols a été mis en place depuis cette date et l'évaluation du réseau de drainage et du bilan hydrique à l'échelle parcellaire et de l'aménagement a également été effectuée (Ben Aissa, 2006).

2.2.1 Localisation géographique

Administrativement, la région de Fatnassa appartient à la délégation de Souk Lahad, gouvernorat de Kébili (33.8° N ; 8.7° E). La population est estimée à 2,889 habitants formant 593 ménages (Gammoudi & Sghaier, 2007). Et comme presque toutes les oasis du sud, l'oasis et le village portent le même nom.

L'oasis est limitée au nord-est par le village de Fatnassa, à l'ouest et au sud par Chott El Djérid (Fig. 2.1). L'oasis de Fatnassa est divisée en deux parties : Fatnassa Nord et Fatnassa Sud. Fatnassa Nord, notée Fatnassa, constitue le terrain d'étude pour ce travail de recherche.

2.2.2 Le milieu physique

Le sol de l'oasis de Fatnassa est de texture sableuse à sablo-limoneuse avec une capacité de rétention et une réserve utile en eau très faibles. Le taux de gypse excède généralement 40 % (STUDI & BRLi, 1999). La circulation de l'eau et la présence d'une nappe salée peuvent favoriser la genèse de formations gypseuses (croûtes gypseuses de nappe ou encroûtement gypseux de nappe) difficilement pénétrables par les racines du palmier (El Fekih & Pouget, 1966).

La nappe superficielle est salée et très proche de la surface surtout en période hivernale. Sa profondeur moyenne varie de 0.80 ± 0.24 m en hiver avec un maximum au mois de février, à 1.06 ± 0.40 m en été (Ben Aissa, 2006). L'apport hivernal excédentaire des eaux d'irrigation (SAPI, 2005), mais aussi la nature du sol (capacité de transfert élevée et une capacité de rétention en eau faible), accentuent la réalimentation de la nappe. De ce fait, sa réponse à l'irrigation est immédiate par contre, son tarissement est plus lent (Ben Aissa, 2006). La topographie de l'oasis et sa situation géographique en bordure du Chott limitent l'efficacité du drainage, naturel ou artificiel.

2.2.3 Ressources en eau, réseau de distribution d'eau et gestion de l'irrigation

L'oasis de Fatnassa est actuellement alimentée par trois sources d'eau (Fig.2.2) : un forage artésien au niveau du Continental intercalaire (CI) : le CI14 et deux forages au niveau du Complexe terminal (CT) : le forage de Taouargha et le forage de Fatnassa II. Le forage de Taouargha (profondeur : 54 m), artésien au début, s'est substitué en 1942 à la source artésienne progressivement tarie ; en suite, le pompage installé en 1987 débite 90 l.s^{-1} avec une salinité de 3.9 g.l^{-1} . Le débit de ce forage est divisé à moitié entre l'oasis de Bechri et l'oasis de Fatnassa. Le forage de Fatnassa II (profondeur : 91 m) débite 50 l.s^{-1} avec un RS=3.6 g.l^{-1} . Initialement utilisé aux années 70 pour l'irrigation d'un groupe de parcelles situées au nord de l'oasis, il a été intégré

au réseau collectif en 1991 avant l'installation du pompage en 1994. Le CI14, mis en place en 1992, est à une profondeur de 2,500 m et la salinité de l'eau est de 2.36 g.l^{-1} . Ce forage est artésien, l'eau atteint la surface à une pression de 20 bars et une température de 71°C . Le forage débite un débit maximum de 100 l.s^{-1} , 80% du débit est acheminé vers un refroidisseur permettant de baisser la température à 45°C . Les 20 % restants du débit sont valorisés au niveau des serres pour la production de cultures maraîchères en primeur, puis rejetée vers un bassin de stockage. La connexion de ces rejets au réseau collectif est programmée en 2007.

L'oasis de Fatnassa est desservie par un réseau collectif d'irrigation permettant d'acheminer l'eau des trois points de captage jusqu'à l'entrée des parcelles. Le réseau d'irrigation est constitué d'un réseau primaire permettant d'acheminer gravitairement dans des conduites souterraines : l'eau du forage CI 14 refroidie à 45°C et celle pompée au niveau des deux forages, vers le partiteur. Au niveau du partiteur, l'eau mélangée est également partagée entre Fatnassa Nord et Fatnassa Sud pour desservir les 214 ha officiellement aménagés. L'oasis de Fatnassa Nord est alimentée par un réseau secondaire constitué de trois conduites souterraines (les antennes A1, A2 et A3) partant du partiteur. Chaque antenne alimente un secteur et un ensemble de bornes d'irrigation (Fig.2.2).

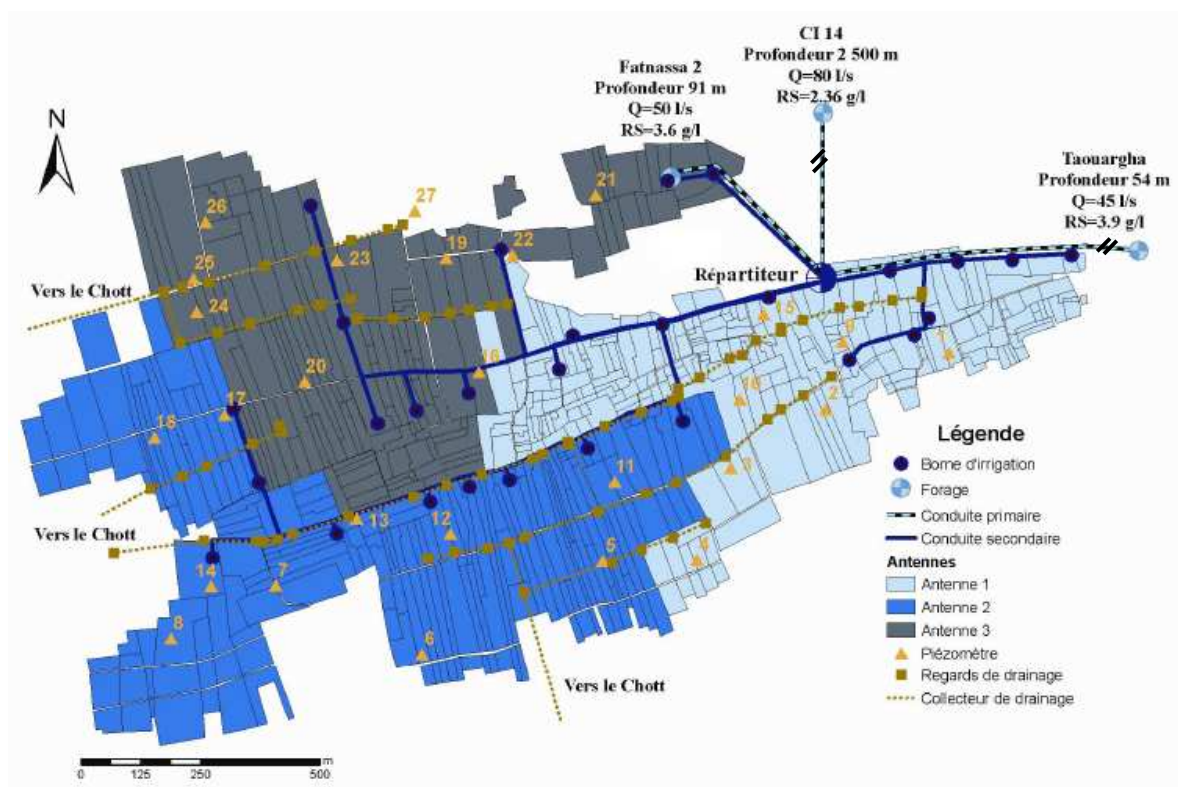


Figure 2.2 : Parcellaire, Réseau d'irrigation & Réseau de drainage dans l'oasis de Fatnassa Nord (n=499 parcelles, 2006-07).

Chaque îlot de parcelles est alimenté par un réseau tertiaire de canaux bétonnés à ciel ouvert (les seguias) qui acheminent l'eau jusqu'à l'entrée de parcelles, parfois complété par des conduites souterraines en PVC. Cet aménagement de l'oasis en réseau d'irrigation tertiaire « amélioré » a été effectué en 2001 dans le cadre du projet APIOS. Au niveau des parcelles, le réseau de distribution d'eau est confectionné par l'irrigant selon principalement trois types de systèmes (Fig. 2.3) : (i) le système traditionnel organisé en bassin et cuvettes alimentées par une ou plusieurs séguia(s) principale(s) en terre, (ii) le système amélioré où des conduites en PVC viennent remplacer les séguias principales en terre, et (iii) le système en calant sous forme de larges bandes entre les palmiers, généralement les bandes sont alimentées par des conduites en PVC. Généralement, la taille des bassins d'irrigation, qui représente la surface mouillée, au niveau du système traditionnel ou le système amélioré varie. On peut distinguer deux catégories à savoir grande ou petite taille.



Figure 2.3 : Le système d'irrigation individuel : (a) traditionnel avec grands bassins, (b) traditionnel avec petits bassins, (c) californien en bandes, et (d) amélioré en conduite PVC.

L'irrigation de surface traditionnelle reste la pratique unanimement utilisée dans l'oasis de Fatnassa comme dans toutes les oasis traditionnelles du sud tunisien. Cette pratique consiste à remplir les bassins traditionnels (ou les bandes entre les palmiers) les uns après les autres avec une distribution manuelle. Habituellement, l'irriguant est présent sur la parcelle au moment de l'irrigation. Il ouvre et ferme les levées de terre qui ferment les cuvettes à la houe en déplaçant le sable afin de faire tourner l'eau de bassin (bande) en bassin, et ainsi de suite séguia en séguia, de parcelle en parcelle, d'amont en aval. Une certaine dénivelée est généralement recherchée au moment de la confection du système d'irrigation afin de favoriser l'écoulement de l'eau et le remplissage des bassins et des bandes.

Au niveau de l'oasis, l'irrigation est organisée en rotation suivant un tour d'eau au sein de chacune des trois antennes d'irrigation. Les irrigants disposent successivement de la totalité de la main d'eau pour une durée théorique déterminée en fonction de la surface. Suite à l'amélioration de l'efficacité du réseau tertiaire dans le cadre du projet APIOS, cette durée théorique est passée de 14 h à 11 h 20 mn par ha. En 2005, ce droit est passé à 10 h.ha^{-1} après l'intégration officielle d'une dizaine d'hectares au tour d'eau. Actuellement, la règle théorique est un droit d'eau de 10 h.ha^{-1} et un tour d'eau d'environ 21 jours. En période estivale, tout le réseau d'irrigation fonctionne à sa capacité maximale d'environ 172 l.s^{-1} . Toutefois, pour éviter le tarif le plus élevé pratiqué par la Société tunisienne d'électricité et de gaz durant la période de pointe de consommation d'électricité située entre 19h et 23h en été, l'eau des deux forages au niveau du CT n'est pompée que 20 h sur 24, soit un débit fictif continu de $0.67 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ou une lame d'eau brute maximale ou une lame d'eau brute de 5.79 mm.j^{-1} ou une lame d'eau nette de 3.8 mm.j^{-1} si on considère une efficacité du réseau portée de 0.46 à 0.68 suite à la réduction des pertes dans les canaux dans le cadre du projet APIOS. Seulement 19 h.j^{-1} sont facturées et l'heure de pompage additionnelle sert pour la mise en eau du réseau. L'eau du forage artésien CI14 alimente en continu le réseau d'irrigation. Les capacités du réseau ne permettent pas de satisfaire les besoins de pointe des cultures et le taux de satisfaction des besoins en eau est estimé à 69.7 % sur l'ensemble de la période estivale d'avril à septembre inclus (SAPI, 2005). En période hivernale, l'eau est distribuée à la demande des irrigants et en réduisant la durée des pompages à la journée (9h30 à 12h sont facturées). Les travaux d'entretien du réseau sont programmés en cette période, en particulier le détartrage de la conduite du CI14. Sur l'oasis de Fatnassa, les capacités du réseau sont surexploitées pendant la saison hivernale (SAPI, 2005).

Dans l'oasis de Fatnassa, le projet de rénovation et de création d'oasis de Nefzaoua a identifié 396 parcelles de base numérotées de 1 à 396 sur une superficie de 136 hectares (CNEA, 1984).

Mais, en raison d'une disponibilité en eau insuffisante et de plantations irrégulières du palmier dattier dans les extensions, seulement 90 ha ont été retenus pour être irrigués par le réseau collectif (CNEA et al., 1987). Suite à l'intervention du projet APIOS et l'amélioration de l'étanchéité du réseau de distribution de l'eau d'irrigation, une dizaine d'hectares a été intégrée officiellement au tour d'eau. Le parcellaire actuel identifie officiellement 467 parcelles réparties sur 112 ha. Ces parcelles sont inscrites au niveau du Groupement de développement agricole (GDA) sur le 'Rôle' précisant la surface, le propriétaire et la durée théorique d'irrigation de chaque parcelle. La gestion du réseau d'irrigation et du tour d'eau est assurée par le GDA de Fatnassa en collaboration avec le Commissariat régional au développement agricole (CRDA). L'aiguadier, payé par le GDA, manœuvre les bornes selon le tour d'eau planifié pour distribuer les différentes mains d'eau, relève les durées d'irrigation pour chaque irrigant et les transmet au GDA. L'eau est payée à l'heure d'irrigation et le tarif varie suivant la saison et la main d'eau, mais aussi en fonction de la durée de pompage. L'eau provenant seulement du CI14, lors de l'arrêt des pompes des deux CT, est gratuite. La facturation des heures d'irrigation est assurée par le GDA et les recettes collectées doivent couvrir les frais de pompage et de refroidissement, la maintenance et l'entretien du réseau collectif et les salaires des employés (pompistes, aiguadier, comptable, ...).

2.2.4 Structure de drainage

Avant 2005, l'oasis de Fatnassa a été drainée par l'ensemble formé par un réseau d'émissaires à ciel ouvert et un fossé central qui prenait son origine de la source de Taourgha jusqu'au Chott. Cet ensemble, orienté dans le sens de la pente, acheminait les eaux de drainage vers le Chott. Il demandait un entretien régulier, d'autant plus que le terrain présente un dénivelé faible vers l'exutoire et les berges présentent une grande instabilité (matériaux sableux). Compte tenu des difficultés d'entretien régulier des fossés de drainage et de l'hydromorphie, le système de drainage à ciel ouvert a été remplacé, récemment, par un système complètement enterré depuis 2001 lors des travaux de modernisation des oasis du sud (projet APIOS). Ce système est composé d'un ensemble de drains (tubes perforés en PVC) disposés de part et d'autre de trois collecteurs débouchant dans des canaux à ciel ouvert qui acheminent les eaux vers l'exutoire (Fig. 2.2). Les interventions du GDA et du CRDA se limitent désormais à l'entretien du réseau à ciel ouvert en aval de l'oasis. L'évaluation du système de drainage enterré au cours de l'évaluation du projet APIOS en 2005 (SAPI, 2005) et les travaux de Ben Aissa et al., (2004) ont montré l'existence de phénomènes de colmatage des drains par les racines et le sable fin qui s'ajoutent aux difficultés d'évacuation des eaux de drainage vers le Chott.

2.2.5 Le système de production

En raison d'une demande forte à l'exportation, la variété '*Deglet Nour*', *Phoenix dactylifera* L., est dominante dans l'oasis de Fatnassa malgré ses besoins en eau élevés et sa sensibilité aux maladies et à l'hydromorphie (Ferry, 1996). Plusieurs autres variétés sont présentes, dites 'variétés communes' ou 'variétés traditionnelles': '*Allig*', '*Fazzani*' et '*Besser Helou*' qui est une variété précoce. La précocité de la variété Deglet Nour et la coïncidence de la récolte avec le Ramadan favorisent actuellement un prix de vente élevé. Les dattes sont commercialisées soit sur pied, soit après récolte puis vendues à des collecteurs. Pour la vente sur pied, l'estimation du prix de la production est basée sur la variété Deglet Nour mais surtout sur le potentiel de production des dattes de bonne qualité de dattes. Les dattes sont triées et classées en différentes catégories sur le champ au moment de la récolte. Les déchets sont utilisés comme aliments pour le bétail. Le périmètre produit aussi un peu de fourrage pour alimenter le cheptel associé à l'activité oasienne. La strate moyenne d'arbres fruitiers a dégénéré, à l'exception de quelques pieds de grenadiers, d'oliviers et de figuiers dans les parcelles non loin du village.

Les exploitations ont des tailles très variables. Elles peuvent être composées d'une à plusieurs parcelle de surfaces variables. Le mode de faire-valoir est diversifié et complexe. Les propriétaires peuvent être des hommes ou des femmes. Des parcelles peuvent avoir plusieurs propriétaires qui sont généralement des frères soit parce qu'ils ont choisi de travailler ensemble leur propriété, ou alors à cause de difficultés de partage de l'héritage très marqué dans l'oasis. Le statut des exploitants est diversifié. La majorité des exploitants ont un statut professionnel à revenus plus ou moins fixes et plus ou moins réguliers. Ainsi, des fonctionnaires, des anciens immigrés, des commerçants, des salariés non fonctionnaires ou les journaliers se côtoient dans l'oasis.

2.2.6 Le foncier, morcellement vs. extension et officialisation

L'oasis de Fatnassa connaît une dynamique foncière continue qui est à l'origine de la mosaïque actuelle du parcellaire (figure 2.4). Cette dynamique est essentiellement liée à deux phénomènes simultanés de morcellement et d'extension des plantations du palmier dattier.

Le morcellement est la conséquence d'héritages successifs. L'abandon provisoire de nombreuses parcelles est souvent la conséquence de difficultés plus ou moins marquées de sa transmission selon les grandes familles. Il est aussi du à la subdivision des parcelles entre des associés issus de la même grande famille ou non. Les parcelles sont parfois vendues, ce qui contribue, selon les cas, à un morcellement supplémentaire ou à l'intégration des parcelles au sein d'une exploitation

existante. Le morcellement peut être aussi mis en relation avec le retour des émigrés au village. Avec le développement des mouvements migratoires, au moins un membre de la famille devait rester au village pour s'occuper de l'exploitation, la rente des émigrés servait pour entretenir et pour agrandir l'exploitation. Après leur retraite, les émigrés sont revenus au village et ont réclamé leur part de l'exploitation.

La disparition du mode de fonctionnement selon le droit d'eau ancestral, le statut des terres nues qui entourent l'oasis (terres collectives privées), la sécurisation de la ressource en eau, l'abondance des revenus de l'exode, mais aussi la croissance démographique ont donné naissance à une habitude coutumière d'extension des surfaces irriguées dans la continuité des parcelles historiques. Le partage des terres a été souvent orienté pour garantir un accès libre de tous les héritiers ou associés à la terre nue. Ces extensions sont principalement entreprises au début par des groupes familiaux et des groupes d'associés généralement du même lignage ou 'Arch'. L'examen de la structure actuelle du parcellaire montre l'existence de cinq zones.

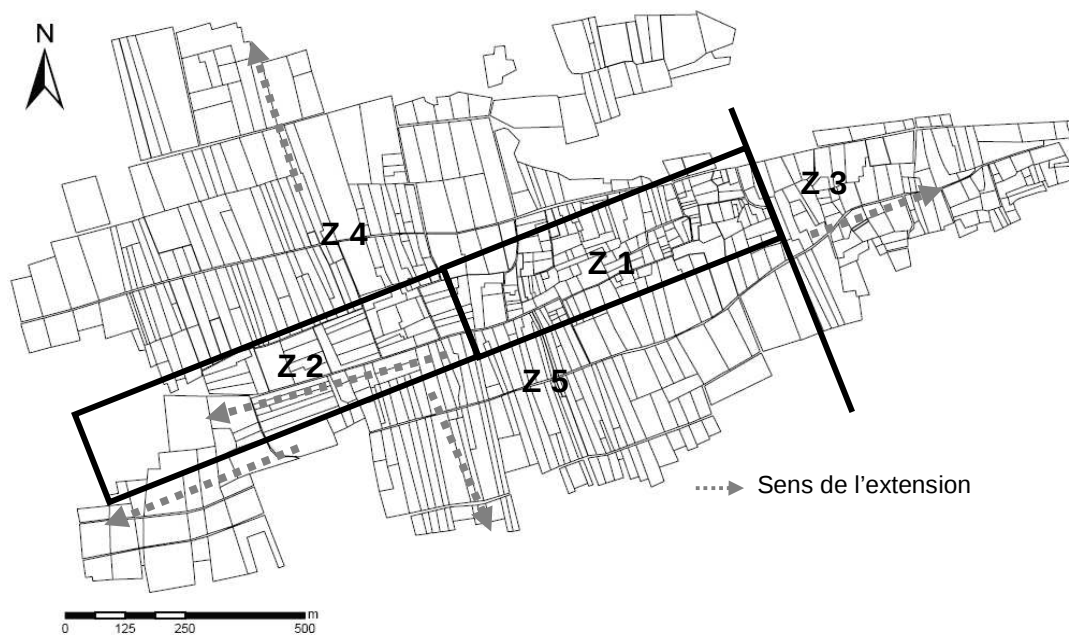


Figure 2.4 : Historique du parcellaire de l'oasis de Fatnassa ; Z1 (1920-30), Z2 (1950-60) Z3 (1969), Z4 (1975-07) et Z5 (1978-07).

La partie ancienne de l'oasis (Z1) a généralement été rajeunie par la plantation de nouveaux palmiers vers les années 1920-30 ; les variétés traditionnelles sont dominantes par rapport à Deglet Nour. Au cours des années 1950 et 1960, des groupes familiaux et des groupes d'associés ont entrepris de nouvelles plantations dans la continuité de l'oasis ancienne vers le Chott (Z2) ; la Deglet Nour se substitue progressivement aux variétés traditionnelles. La partie comprise entre

l'oasis ancienne et le village (Z3) a été plantée en 1969, année de passage en domanialité des terres privées ; la variété DN devient prédominante par rapport aux VT. La création du forage artésien de Fatnassa 2 en 1975 a permis l'extension des parcelles historiques (Z1 et Z2) vers le Nord (Z4), à l'exception de celles qui n'ont pas une possibilité d'extension à cause de la présence d'une barrière physique comme les dunes ou les habitations. Depuis cette époque et jusqu'à l'intégration du forage de Fatnassa au réseau collectif en 1991, cette zone a été irriguée sans règles précises, entraînant des tensions sur les ressources en eau et en terre. En voyant les agriculteurs du secteur nord bénéficier de nouvelles plantations, les groupes familiaux et les groupes d'associés du secteur sud (Z5) ont commencé à planter dans la continuité de leurs parcelles historiques à partir de la fin des années 1970. Les parties Z3 et Z2, et dans une moindre mesure la partie historique Z1, n'ont pas pu s'étendre et ont été les principales victimes du processus de morcellement.

L'accroissement des surfaces irriguées a engendré très tôt une perturbation du tour d'eau dans les zones historiques et la partie sud de l'oasis. L'impact de cette perturbation sur la performance des exploitations est très marqué et est visible dans le secteur du sud. En effet, pour augmenter la fréquence du tour d'eau en période de pointe, les agriculteurs étaient obligés d'irriguer la parcelle historique et de délaissier les nouvelles extensions.

Une première phase d'officialisation des groupes d'extensions a été réalisée au moment de l'intervention du projet de la Nefzaoua en 1987, et la deuxième phase avec l'amélioration de l'étanchéité du réseau tertiaire suite à l'intervention du projet APIOS. Depuis, des agriculteurs procèdent individuellement pour l'intégration de leurs extensions dans le tour d'eau auprès de l'administration ; d'autres continuent à les irriguer illicitement. L'intégration des extensions, officielles ou non, dans le tour d'eau limite ainsi la capacité du réseau d'irrigation et contribue aux dysfonctionnements du tour d'eau dans la mesure où le tour d'eau théorique a été calculé sur la base d'une surface officielle bien déterminée.

2.2.7 Le calendrier cultural

Les pratiques agricoles s'étalent sur toute l'année agricole avec des périodes de pointe où de la main d'œuvre occasionnelle plus ou moins qualifiée peut être employée. Les principales pratiques pour un cycle cultural sont :

L'irrigation périodique des parcelles généralement selon la fréquence du tour d'eau ;

Le travail du sol de la récolte jusqu'à la fin du printemps. Le travail du sol consiste en un grand labour (40 cm), suivi d'un apport de sable et de fumier et de leur mélange au sol existant à la sape, l'arrachage des mauvaises herbes et surtout les racines du chiendent, et finalement le nivellement du terrain et de la confection du système d'irrigation. Le travail du sol est généralement accompagné par le semis de l'orge et de la luzerne.

La pollinisation au cours du mois d'avril : vu le nombre réduit de pieds mâles '*Dhokkars*', la pollinisation manuelle devient obligatoire. Généralement les pieds mâles fleurissent avant les pieds femelles. Les inflorescences de pollen sont alors collectées juste après l'ouverture de la gaine (à la maturité de pollen) pour empêcher sa perte par envol, et ensuite conservés dans un endroit frais en attendant l'ouverture de la gaine de l'inflorescence femelle. La pollinisation consiste à placer plusieurs épillets mâles au cœur du futur régime femelle et à attacher l'inflorescence avec un lacet de foliole. La pollinisation ne doit pas être effectuée pendant les jours venteux ou pluvieux afin de favoriser la germination du pollen. En effet, un vent sec dessèche les stigmates des fleurs femelles, un vent violent ou la pluie entraînent le pollen, et le froid (vent ou pluie) gêne la germination (Peyron, 2000). Au moment de la pollinisation, un premier éclaircissage est effectué en enlevant les petits bouquets.

En juillet s'effectue le tuteurage des régimes. Cette pratique consiste à la suspension du régime, à 'peigner' les épillets du régime, et à le reposer sur une palme afin que la hampe ne casse pas (et ne condamne ainsi le régime de dattes). Un deuxième éclaircissage ou ciselage peut être effectué en enlevant les petits épillets.

L'ensachage qui consiste à la couverture des régimes en août et septembre pour protéger les dattes contre les pluies automnales et l'augmentation de l'humidité à l'intérieur du régime qui pourrait dégrader la qualité des dattes. Un dernier ciselage peut être effectué en enlevant les dattes de petit calibre ou celles non fécondées.

La récolte d'octobre à décembre. Le tri des dattes Deglet Nour s'effectue sur le champ et juste après la coupe des régimes. Généralement un jeune grimpe au palmier dattier, attache le régime à couper à une corde, coupe la hampe et coulisse la corde pardessus une palme. Rarement, plusieurs personnes grimpent à différentes hauteurs du tronc et se passent le régime de main en main. Ces deux méthodes permettent d'amener le régime à terre sans le heurter au sol de façon à ne pas abîmer les dattes. Généralement une bâche est étendue sous le palmier pour recueillir les dattes qui tombent du régime en évitant ainsi leur mélange avec du sable ou d'autres déchets. Une fois au sol, la hampe du régime est tout d'abord coupée, ensuite les épillets sont coupés et séparés

du régime, et les dattes de mauvaises qualités sont enlevés. Les épillets propres sont mis en caisses, c'est les dattes branchées ou les dattes de bonne qualité. Les épillets des régimes de dattes sèches sont directement mis en caisses. Les dattes qui tombent des régimes sont classées en plusieurs catégories en vrac : les dattes non encore mures '*Chbaba*', les dattes sèches, les dattes demi-molles, et les déchets. Chaque catégorie est mise en caisses à part. Généralement, ce sont les jeunes qui coupent les régimes, les plus âgés et qualifiés coupent les épillets et trient les dattes branchées, et les femmes trient les dattes en vrac.

Et finalement, le 'toilettage' du palmier dattier s'effectue généralement juste après la récolte. Ce toilettage consiste à couper les palmes totalement sèches, cassées, ou abîmées.

2.3 Conclusion

Dans les oasis du sud tunisien et malgré cette situation difficile, les enjeux économiques et sociaux actuels sont importants. Il s'agit principalement de promouvoir le secteur de dattes, de l'amélioration du bien être de la communauté oasienne, et de la limitation de l'exode rurale. Cependant et malgré les importants investissements dans le cadre du PDES pour la réalisation des forages puis récemment dans le cadre du projet APIOS pour la modernisation des infrastructures d'irrigation et de drainage afin de préserver les ressources en eau souterraine non renouvelables et de mieux valoriser les ressources en eaux et en sols utilisées, des dysfonctionnements subsistent. En plus du cadre climatique hostile, l'agriculture irriguée dans ces régions est soumise à de fortes pressions environnementales, agronomiques, foncières et socio-économiques.

Ce travail consiste en une première étape de diagnostic qui permet de caractériser la problématique de la région d'étude. Cependant, le problème se pose en termes de méthode d'analyse du fonctionnement et d'identification des facteurs qui influencent les performances et la capacité d'adaptation des agriculteurs. Comment identifier les facteurs qui handicapent la productivité des ressources utilisées ? Quelle méthode de représentation de leur chaîne de causalité ? Comment les contraintes sont perçues et comment elles affectent les performances du système ? Et quelles sont les pratiques utilisées pour y faire face ? et d'autres questions que nous allons essayer d'éclairer dans le chapitre 3.

Chapitre 3 : Confrontation de la vision d'ingénieur et de la perception et des pratiques d'adaptation des agriculteurs

« C'est l'eau qui raconte le mieux la société, la société raconte avant tout l'eau, se raconte à travers l'eau ».
L'eau, l'amie du puissant.
G. Bédoucha (1987)

Ce chapitre constitue une analyse du discours, des pratiques et de la perception des contraintes par les agriculteurs, et de mettre en évidence les avantages, les limites et les synergies de la représentation des agriculteurs avec le programme de modernisation mis en œuvre par les ingénieurs. Il a fait l'objet d'une publication : Ghazouani W., Marlet S., Mekki I. & Vidal A. (2009). Farmers' perceptions and engineering approach in the modernization of a community-managed irrigation scheme. A case study from an oasis of the Nefzawa (South of Tunisia). *Irrigation and Drainage* **58**: S285-S296. Dans ce chapitre nous présentons cet article publié en anglais avec un résumé et une conclusion en français.

Les résultats sur la salinité ont aussi contribué à la préparation d'un second article : Bouarfa S., Marlet S., Douaoui A., Hartani T., Mekki I., Ghazouani W., Benaïssa I., Vincent B., Hassani F. & Kuper M. (2009). Salinity patterns in irrigation systems, a threat to be demystified, a constraint to be managed: field evidence from Algeria and Tunisia. *Irrigation and Drainage* **58**: S273-S284.

Résumé

Les programmes d'irrigation et de drainage sont généralement fondés sur des considérations techniques et économiques sans implication notable des bénéficiaires. Cette étude a pour objectif de confronter l'avis des ingénieurs lors de la modernisation du périmètre oasien à la perception des contraintes par les agriculteurs. Il s'agit d'analyser le discours, les pratiques et la perception des agriculteurs, et de mettre en évidence les avantages, les limites et les synergies de la représentation des agriculteurs avec le programme de modernisation mis en œuvre par les ingénieurs. L'analyse des contraintes est fondée sur l'analyse de trois études d'ingénierie à savoir deux études de faisabilité des programmes de modernisation des périmètres irrigués dans les oasis du sud (1996 et 1999), et l'évaluation de ces programmes après la mise en place des modernisations projetées (2005), d'une part, et sur des entretiens avec les agriculteurs (2007), d'autre part. Les relations de causalité sont représentées séparément sous la forme de deux arbres à problème en fonction de la perception des agriculteurs et des avis d'ingénieurs.

Les résultats montrent que les solutions techniques mises en œuvre par les ingénieurs n'ont pas permis d'atteindre les améliorations attendues parce qu'elles ne prennent pas en compte le poids d'une gestion collective inappropriée du système oasien. Les agriculteurs sont conscients des contraintes dues à l'engorgement et à la température élevée des eaux d'irrigation car ils peuvent relier les causes et les effets. La faible fréquence du tour d'eau est citée comme la principale contrainte en dépit du fait que les agriculteurs sont eux-mêmes responsables de la faible efficacité des irrigations et de l'extension continue des plantations de palmier dattier. Les agriculteurs n'ont pas mentionné la dégradation des sols, indirectement perçue ou parce qu'ils appliquent des mesures correctives. Cette étude de cas soutient une réflexion critique sur les limitations de chaque approche, et les avantages d'une combinaison des connaissances des experts et des agriculteurs.

3.1 Introduction

In arid regions, the performance of irrigated agriculture is dependent on the efficiency of water distribution and application, especially in the face of increasing water demand, decreasing water availability, and widespread salinity and waterlogging hazards (Saeed et al., 2002). Hence the development and sustainability of irrigation depend on significant improvement in water management that combines technical, social and organizational issues (Clemmens et al., 2000).

Engineering research approaches based on hydraulic and agronomic considerations have been used to design irrigation and drainage networks for optimal distribution and application of water. However, only technical aspects were taken into account, and these top-down approaches often failed to identify the full range of constraints that hinder effective irrigation management. Integrated analyses incorporating agronomy, natural resources management, hydraulics, economics and social sciences have therefore been promoted. But the inherent complexity of irrigation systems makes integrated analysis difficult. For that reason, local bottom-up participatory approaches have gained recognition as they allow people to manage their own systems and to make them more effective and sustainable. As both the definition of the problem and analysis of the constraints rely on farmers' participation, their perception has become a key issue for diagnosis and action planning (Desbiez et al., 2004). They are based on long-term practical experience in cultivation, sometimes acquired over generations, and the farmers' practices reflect their close contact with the environment (Ali, 2003). On the other hand, bottom-

up participative approaches have their own limitations, which also require critical analysis (Smith, 2008).

Famous for the production of the Deglet Nour date, the Nefzaoua oases have played an important socioeconomic role in the subsistence economy of indigenous semi-nomad people (Sghaier, 1995; Kassah, 1996). But successive interventions have affected the strict ancestral arrangement of water rights described by Bédoucha (1987). Since the 1970s, the expansion of irrigated land has been encouraged by the Tunisian authorities through the large-scale allocation of fossil groundwater resources from the Complex Terminal (CT) aquifer and the underlying Continental Intercalaire (CI) aquifer within the Tunisian management plan for southern water resources project (“Plan Directeur des Eaux du Sud”, PDES). But expansion exceeded government expectations due to the development of the so-called “illicit” deep wells belonging to private farmers, and to continuing planting of palm trees at the edge of existing oases. In the last few decades, the CT aquifer has been gradually tapped by deep wells and pumping, causing a decline in its depth, and an increase in its salinity (Zammouri et al., 2007). The CI deep aquifer was not exploited until the 1980s. Most of the wells that tap the CI aquifer are artesian, and groundwater is saline and geothermal with temperatures ranging between 60 and 70°C. Recently, the APIOS project (Amélioration des Périmètres Irrigués dans les Oasis du Sud) has been undertaken to improve the irrigation and drainage schemes and to increase farmers’ incomes in the oases of southern Tunisia. The project was implemented from 1997 to 2005 in 88 oases covering 14 425 ha. However, a certain apprehension has been expressed by the extension services and the farmers who do not observe an improvement of irrigation water use efficiency nor an enhancement of farm productivity. While oasian agriculture continues to provide substantial benefits to the communities, the oases are currently facing sustainability concerns due to uncontrolled expansion of irrigated areas, overexploitation and degradation of groundwater resources, and soil degradation due to waterlogging and salinity in the vicinity of a saline natural depression, Chott el Djerid.

In view of the fact that controversy persists about the appropriate approach for the diagnosis and implementation of action programmes in irrigation schemes, the opportunities and risks associated with each approach clearly need identifying. The main purpose of this study was to analyse farmers’ discourse, practices and perceptions of the modernization of a small oasian irrigation scheme in Fatnassa where the relevance of top-down engineering and bottom-up participatory approaches was assessed. The aim was to reveal the dissimilarities, limits and

possible synergies relating to the analysis of constraint. Such synergies should enhance the relevance of diagnosis and action planning combining technical reliability and farmers' knowledge and expectations.

3.2 Methods

3.2.1 *Elicitation of farmers' perceptions*

Our approach was based on individual and semi-directive on-farm interviews that focused on farmers' constraints. Individual interviews were conducted rather than interviews in large groups which tend to produce a synchronized "chorus line" of mutually agreed responses and fail to capture the individual points of view (Sileshi et al., 2008). Successful analysis requires capturing the diversity of farmers' knowledge, perceptions, beliefs and way of talking in their own terms, and developing an analytical understanding through the aggregation of these individual accounts (Blackstock et al., 2007). Such open-ended questioning can lead to in-depth discussions with farmers, and thus allow more relevant information to be obtained (Lado, 2004). In addition, on-farm interviews helped the farmer to keep to the point and also enabled the interviewer to check the farmer's discourse through field observations.

Out of a population of 286 farmers, 25 were selected in cooperation with the GDA for a field visit and individual interview in the farmers' language: the local Arabic dialect. The interviews were conducted during winter 2007 and lasted from 45 minutes to 1 hour. The farmer was first asked to describe the farming and cropping systems from a historical perspective, before the interview focused on the constraints mentioned by the farmer (Tab. 1, annexe). The dialogue was structured as recommended by Vandersypen et al. (2006). When a farmer brought up a specific problem, the following questions were asked: How did you identify the problem? What are its causes and effects? What did you do to solve the problem or minimize its effects? The farmer's reply could bring up another problem, and the discussion then continued respecting the farmer's way of proceeding. Specific attention was given to vernacular words.

3.2.2 *Schematic representation of constraints*

A problem tree is a visual tool that reveals the causal relationships between the main problems according to a graphical arrangement of causes and effects joined by a core problem (Abdul Quium & Moon, 2003; CGIAR, 2006). It helps representation of complex problems by linking different constraints and their consequences in a clear, visual and rapid way.

A problem tree approach was used to represent farmers' perception of the constraints. The first step was to identify the core problem which became the "trunk" of the tree. The primary causes of the core problem were positioned as the "roots" and the effect as the "branches" (Renger & Titcomb, 2002; Douthwaite et al., 2007).

The procedure was repeated in order to build a hierarchical chain for each cause until the list of constraints was exhausted. Since some causes had two or more consequences, arrows were included in the representations. Some interactions between causes were also presented as dotted-line arrows.

The same approach was used to build a problem tree based on the implementation of the modernization projects previously presented. In most projects, a problem tree is first built and then inverted into an objective tree for action planning (e.g. Abdul Quyum & Moon, 2003; CGIAR, 2006). In our case, we first built the objective tree which was then inverted into a problem tree relating to the presumed constraints that justified the objectives of the projects.

3.3 Oasis modernization and technical improvements

The most important constraints and causal relationships identified through the implementation of the modernization projects are summarized in Figure 3.1. The core problem is "low cropping intensity, crop yields and production". It is a combination of three main causes: water deficit, high soil salinity and hot irrigation water. Water deficit impacts on the frequency of the water delivery turn and the extension capacity of the irrigated area. The interaction of these constraints impacts on crop production and farmers' incomes.

According to the modernization projects the water deficit in Fatnassa oasis resulted from three main causes: (i) deficit of water extracted at sources; (ii) poor distribution efficiency at the scheme scale; and (iii) poor application efficiency at the field scale (Sanyu Consultants Inc., 1996). The Special Assistance for Project Implementation (SAPI) study team (2005) estimated that the water deficit was reduced due to the screening of the CI 14 deep well within the PDES project. The irrigation capacity was increased from $2,473 \times 10^3 \text{ m}^3$ in 1994 to $4,050 \times 10^3 \text{ m}^3$ in 2004. But extension of the plantation continued and crop water requirements remained higher than system capacity from April to September. At the scheme level, the replacement of the former earth canals with distribution pipes and concrete canals was reported to allow a 25–30% reduction in seepage losses. The distribution efficiency was thus improved from 46 to 68% and

the completion of water requirements from 50 to 70%. The irrigation interval of 60 days in 1994 was shortened to 25 days. The irrigated areas between the three sectors were approximately equalized to favour equitable water delivery. At the farm level, the dissemination of water-saving methods, including subsidies for the construction of concrete irrigation canals for 25 farmers, enabled irrigation to be reduced from 14 to 11.33 h ha⁻¹. In 2005, irrigation was further reduced to 10 h.ha⁻¹ in relation with the incorporation of an additional 10 ha. The system capacity was considered by the project to be too low to allow irrigation of new plantations.

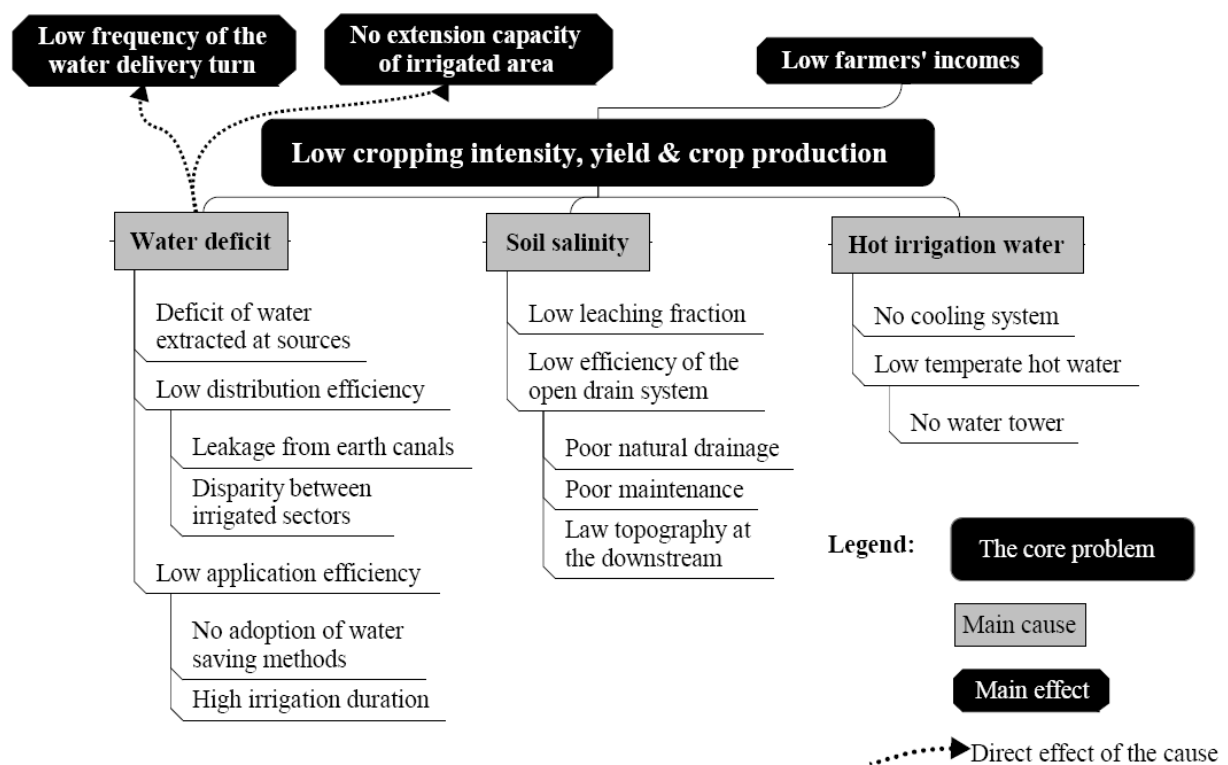


Figure 3.1: Problem tree based on the modernization projects.

Given the high salinity of irrigation water, the leaching fraction was considered by the APIOS project to be too low to prevent soil salinization. The constraint was put down to the limited efficiency of the open drain system, in particular regarding maintenance, poor natural drainage, and the low slope at the outlet of the system (BRLi & STUDI, 1999). Since 2002, open drains have been replaced by collectors and tile drains buried at a depth of about 1.5m with 100m drain spacing.

The APIOS project considered that the water cooler installed in the course of the PDES project was not sufficient to decrease the temperature of the geothermal well. Thus, a water tower, which lowers the temperature by mixing the CT and CI water sources, was set up.

With these improvements, the SAPI study team (2005) estimated that farmers' incomes would increase by 36% resulting both from a 21% increase in crop yields, and from an increase in cropping intensity from 133% in 1994 to 162% in 2004.

3.4 Farmers' discourse and practices

Figure 3.2 shows the most important findings and the relationships between the major constraints, their causes and effects based on the farmers' discourse. The core problem, 'poor land productivity', is defined as a combination of three main causes: low frequency of the water delivery turn, especially in summer; waterlogging in winter; and hot irrigation water. These constraints are considered by the farmers to affect performance of the date palm plantation and fodder crops, and as the root causes of the disappearance of fruit trees and legume crops well known in the traditional cropping system. These effects are related to one or several constraints.

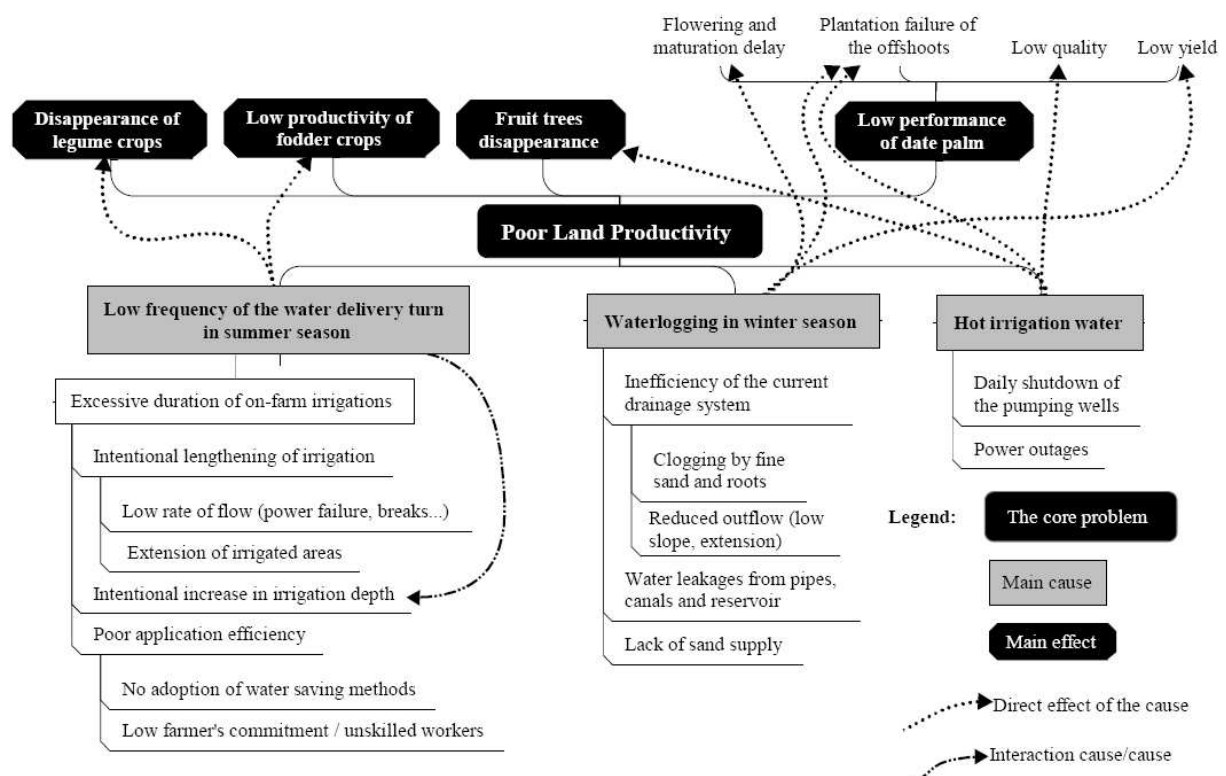


Figure 3.2: Problem tree according to the farmers' discourse.

3.4.1 *Low frequency of the water delivery turn*

Farmers reported that everyone knows the prescribed irrigation duration for each of his fields but does not necessarily comply with the collective rule for three main reasons. First, farmers intentionally lengthened irrigation time when the rate of flow was lower than expected due to power outage, pump breakdown, breaks in the pipes or canals. Some said they had new plantations at the edge of their field, irrigating the whole plantation at the same time. Those who cannot extend their plantation complain about individualistic behaviour that discriminates against the other farmers. Second, farmers sometimes intentionally increased the irrigation depth to overcome the lack of water due to the long turn and uncertainty of the next rotation. Third, some farmers complained about other farmers' commitment and irrigation practices and the resulting poor application efficiency. They reported that most of the farmers have additional activities or do not even live in the village, and entrust unskilled workers with irrigation.

Farmers reported that before the 1970s the water delivery turn was regular at a frequency of less than 15 days, allowing cultivation of vegetables both during winter and summer: carrots, turnips, onions, tomatoes, peppers, parsley, spinach, cucumbers, salad greens, and fodder crops composed of barley and alfalfa. The increasing duration of water delivery turn first meant the end of vegetable cultivation and a decline in fodder crop yields. Whereas the water delivery turn was considered to be the main cause of the low productivity of the date plantation, the symptoms of water stress on date palm trees remain unclear. The farmers just reported that the date palms become thin and breakable when, exceptionally, the irrigation interval exceeds three months.

To overcome water shortages, some farmers said they reused drainage water by obstructing the collector and pumping in the manholes. Others tapped the phreatic aquifer, which was often mixed with free hot water from the CI aquifer delivered during the pumping wells shutdown. They could intentionally lengthen irrigation to obtain this free water, in particular to irrigate extensions. But most of the farmers had progressively abandoned the use of the so-called "dead water" from drainage and shallow wells as they became aware of the decrease in productivity of the fodder crops and then of date palms a few years after implementation. A few farmers also had deep wells that illicitly tapped the CT. Some farmers adopted water-saving techniques like water distribution through buried pipes in their field, and declared a reduction in the irrigation duration. They suggested adoption of these techniques by all farmers to increase the irrigation frequency. But most were reticent and preferred traditional basin irrigation which "keeps the air moist and

prevents the dates drying out during summer''. In addition, they suggested the collective rules should be enforced and some raised the question of laxity on the part of the GDA.

3.4.2 Waterlogging and drainage

Waterlogging is locally called *nezz* by the farmers, referring to the continuous presence of water in the Tunisian dialect. Waterlogging was mainly considered as a seasonal constraint during winter. The farmers did not say that the soil remains wet (*mabloul*), but rather that it is oily (*m'zayet*), even if the plot has not been irrigated for a long time. The soil becomes hard and dry during summer.

All the farmers first mentioned the low efficiency of the new drainage system. They asserted that the former open drains were much better than the buried tile drains, which are obstructed by roots and fine sand. Recently, some farmers again dug traditional drainage ditches. Outflow was also reduced due to the low slope and poor maintenance of the open drainage collector at the outlet of the system. The farmers were aware of water leakages resulting locally from broken pipes and canals due to low soil stability and ground subsidence. They also pointed to water leakages from a reservoir that collected waste water from the greenhouses located to the north of the oasis. In areas affected by waterlogging, flowering and maturation were delayed while date palms had a thin, yellow canopy, sparse and meagre fruit bunches and lower yields. The plantation of offshoots was also reported to fail in affected areas.

Because the farmers were apprehensive about waterlogging and its effects, their discourse linked many practices and strategies with waterlogging. Every 3–5 years, most of them apply sand associated with manure and plough the land to encourage a better root system and date palm development, as well as earlier flowering and maturity. In addition, farmers sometimes abandoned old plots and preferred supplying sand and manure and relocating fodder crops in more recent plantations. The supply of excessive irrigation during winter was reported to allow ‘‘substitution of dead water by living water’’.

3.4.3 Hot irrigation water

Despite the installation of a water cooler and a water tower, the high temperature of the artesian CI aquifer remained a serious problem for farmers during the daily interruption of the two CT aquifers. The problem can also occasionally occur due to power outage or if the GDA electricity bill is not paid. The farmers believed that most of the fruit trees, e.g. olive, fig, apricot, pomegranate and vines, were killed by hot water during the two years following the installation

of the geothermal well (CI14) when the water cooler had not yet been installed. They also reported the actual plantation failure of young and sensitive date palm trees and poor date quality.

The farmers used various practices to overcome the problem. They could mix geothermal water with drainage water or phreatic water or groundwater. Some sent the geothermal water into surrounding abandoned plots or into the drainage network. Others tried to disperse the hot water among many sectors and basins, and to avoid irrigating sensitive young palm trees and offshoots.

3.5 Discussion

3.5.1 Farmers' perceptions

Farmers' perceptions firstly depended on their ability to link causes with effects. Farmers were aware of the beneficial effect of sand and manure supply on root growth and on the development of both date palms and fodder crops. Waterlogging was also easily identified as the soil remained wet, the date palm canopy turned yellow and bunch initiation was delayed. Hot irrigation water caused the disappearance of fruit trees, the failure of offshoots to stay alive, and poor date quality. The low frequency of the water delivery turn caused the disappearance of legume crops and low productivity of fodder crops. On the other hand, it was paradoxical that all the farmers complained about the low frequency of the water delivery turn but did not mention water stress suffered by the date palms.

Even if the farmers were not conscious of certain constraints, they introduced adaptations based on experience. For instance, although farmers did not qualify soil degradation using specific terms, nor identify soil salinity as a constraint, some practices could be related to soil degradation or salinity management, like the frequent supply of sand and manure, abandoning old fields, refusing to use drainage water and phreatic groundwater table for irrigation, or winter leaching. Farmers spoke about “dead water” for the groundwater table, thereby probably referring to saline water. It is also notable that the farmers spoke about “oily soil” instead of wet soil when they described the symptoms of waterlogging. These farmers have lived for generations in a permanently saline environment conditioning their perception: “a fish in the ocean would be the last to discover water” (Vicente & Partidario, 2006). Salinity is sometimes considered by farmers as an advantage for date quality. That implies that salinity would not necessarily be considered as a direct cause of low land productivity but as a context to be managed. The farmers, therefore, emphasize low frequency of the water delivery turn and

waterlogging as major constraints because salt leaching depends mainly on irrigation and drainage capacity. In such a complex situation, possible misunderstanding remains between interrelated causes like waterlogging, water stress and salinity. Water stress and salinity could also exhibit similar effects and possible synergy by lowering soil water potential (Tripler et al., 2007). Shani et al. (2005) showed that the response of date palms depends on the most severe stress rather than on combinations of individual effects. That means that a dominant factor could mask the other constraints, and could also explain why farmers emphasized waterlogging and the low frequency of the water delivery turn, but did not mention salinity as a constraint. The poor perception was also accentuated because date palms, alfalfa and barley are tolerant of salinity although they may be affected (Ayers & Westcot, 1985; Shani et al., 2005). In many other locations, farmers are more apprehensive of salinity and have created specific vernacular terms to describe it because of the need to adapt their cropping systems, even if salinity is lower (Saeed et al., 2002; Yunus Miah et al., 2004).

Some practices had complex objectives that were analysed by farmers using several criteria.

The sand and manure supply was usually mentioned in the farmers' discourse about waterlogging because it was intended to raise the soil surface level in some lower places. But it was also considered as a way to mitigate soil salinity and soil degradation, and a condition to sow fodder crops. Sand supply also made levelling and maintenance of the field easier for efficient application of irrigation.

Most farmers expressed the same discourse. Even though waterlogging did not affect everyone, all the farmers complained about the inefficiency of the new drainage system and canal leakages. This social discourse relied on both real malfunctions and subjective considerations, such as the rejection of the buried drainage system that had been imposed on the farmers to replace the former individual ditches. This behaviour is in agreement with that observed by Singh et al. (2007) about successful choices and innovations in water management.

The farmers tended to minimize their own responsibility, and their discourse concerning irrigation management was ambivalent. On the one hand they complained about the low frequency of the water delivery turn and called for the strict application of collective rules. On the other hand, most of them continuously expanded their plantations and lengthened irrigation time. This individual behaviour is in agreement with the classical non-cooperative Nash equilibrium concept (Faysse, 2005), in which no farmer has anything to gain by changing only his own strategy unilaterally. Inadequate collective irrigation rules can lead to optimizing individual

strategy, i.e. planting and irrigating more, which in turn leads to decreasing community performance. This poor water management raised the question of sustainability.

3.5.2 Limits and possible synergy of the approaches

The engineers envisaged that modernization of the irrigation scheme, enhanced water delivery, and operational rules would increase distribution efficiency and the sufficiency rate. But excessive length of the water delivery turn has not been significantly reduced; indeed, the actual rotation frequency can reach up from 40 to 60 days in the summer peak season (Ghazouani et al., 2007). An expensive technical choice of buried tile drains was implemented to prevent salinization and waterlogging. This option proved to be simultaneously: (i) technically inefficient due to clogging by sand and roots, and due to poor discharge in the low-lying area at the outlet during winter; and (ii) disliked by the farmers who preferred individual ditches and the former open drain system. Although a water cooler and a water tower were installed to lower the geothermal water temperature, the farmers unanimously complained about the hot irrigation water, which can still occur during the daily shutdown of the cold wells or due to occasional power outages. On these aspects, the top-down engineering approach failed to diagnose the overall problem because it did not take the farmers' experience and points of view sufficiently into account, and consequently failed to provide effective, suitable and acceptable solutions.

On the other hand, farmers' perceptions showed some limitations and would not always provide effective solutions. The farmers did not clearly grasp overexploitation of the water resources or that system capacity was clearly not sufficient to match increasing water demand during the summer season. It consequently did not prevent farmers from extending the irrigated area that has become their main strategy and has adverse effects at the expense of the whole irrigation system. They are not aware of the salinity hazard that results from salinization of the irrigation water and the continuous extension of plantations that put a strain on drainage and leaching capacity.

Even though the oasis had traditionally been managed by the farmers for a very long time, they did not comply with the prescribed rules, and the resulting operational problems did not enable the water users' association to conduct efficient community-managed irrigation. A successful bottom-up approach for change would thus require both strong support from experts and increasing farmers' awareness of the real problems.

The results of this study suggest that engineers and farmers' skills could be combined for effective diagnoses and to identify reliable solutions. In the case of irrigation, we observed that

neither the engineers' technical solution nor the farmers' community management was able to significantly increase irrigation efficiency. The farmers still lack information on the stakes involved in sustainable water resources, and relevant assessment of irrigation and drainage performance that could be provided by the extension services. Enhanced understanding of the processes should help the farmers to find locally appropriate solutions. When the farmers' perceptions of problems are relevant and the objectives clear, this combined approach could favour a participatory process in which decision making is enhanced by more comprehensive information inputs and by embracing a diversity of knowledge and values (Reed, 2008). In return, awareness of farmers' perceptions and willingness should help extension services to build appropriate solutions and messages.

3.6 Conclusion

Dans l'oasis de Fatnassa, le diagnostic d'ingénieur et la perception des agriculteurs ont été confrontés. L'objectif était d'évaluer la pertinence des approches d'ingénierie et de celles participatives dans l'optique d'une identification holistique des contraintes effectives et de leur relation de causalité dans périmètre irrigué collectif. Les résultats ont montré que le diagnostic d'ingénieur a été orienté vers des solutions techniques pour améliorer la performance de l'irrigation et du drainage (augmentation de la capacité du système d'irrigation, amélioration de l'efficacité de distribution et d'application, installation d'un refroidisseur et remplacement du réseau de drainage traditionnel à ciel ouvert par un réseau enterré). Quant aux agriculteurs, ils ont montré une bonne connaissance des dysfonctionnements techniques liés aux réseaux d'irrigation et de drainage (pannes, fuites, colmatage minéral et organique,...) et de la déficience de l'organisation collective de l'irrigation mais aussi de leur part de responsabilité dans cette déficience. De plus, et grâce à leur expérience et aux pratiques ingénieuses héritées de plusieurs générations, les agriculteurs gèrent les contraintes du milieu malgré qu'ils n'appréhendent pas certains processus, notamment liés à la salinité et à la compaction. Or, la confrontation des deux modes de représentation du fonctionnement du système basés sur la vision de l'ingénieur et la perception des agriculteurs montre ainsi les limites des deux approches. D'une part, *la vision techniciste* n'a considéré que les faits techniques et a visé l'amélioration des performances du système par l'amélioration de l'efficacité des réseaux d'irrigation et de drainage sans considérer ni la dimension sociale liée aux règles collectives de gestion et de partage des ressources communes, ni l'acceptabilité sociale des changements techniques adoptés. D'autre part, *la vision participative* a montré l'incapacité des agriculteurs à identifier certaines relations de causalité (la

relation engorgement/salinité, la relation stress salin/stress hydrique, la dégradation de la fertilité et de la qualité du sol due à la salinisation et à la compaction, le stress hydrique et son effet sur le palmier dattier, la dégradation de la fertilité et de la qualité du sol et son effet sur le palmier dattier, ...). Ainsi, dans une perspective d'identification des principales contraintes et de leur relation de causalité et pour pallier à l'ensemble de ces limitations, nous proposons d'aller au-delà des faits techniques et de la perception des agriculteurs dans une analyse critique du discours et des pratiques d'adaptation des agriculteurs.

La démarche mise en place nous a permis ainsi une identification holistique de l'ensemble des contraintes, de leurs causes et leurs effets sur les performances des systèmes de cultures oasiens avec un certain degré d'hiérarchisation. Les relations de causalités sont supposées être les futures hypothèses à tester. Basée sur ces hypothèses, l'étape suivante consiste à mettre en place un système d'évaluation des performances de l'irrigation et du palmier dattier (cf. Chap. 4). Il s'agit donc d'affiner mais aussi de valider les résultats obtenus jusqu'ici dans une confrontation objective de l'analyse diagnostic à des données réelles en se basant sur des investigations de terrains menées au cours des années agricole 2006-07 et 2007-08. La démarche méthodologique suivie dans la mise en place du système d'évaluation est présentée dans le chapitre 4 ci-après.

Chapitre 4 : Conception du système d'évaluation des performances hydrauliques et agronomiques de l'oasis

*« Si on parle d'avenir, de futur aux jardiniers du Jérid, on s'entendra répondre en écho ... mektub ».
Les échelles temporelles des oasis du Jérid tunisien
V. Battesti (2000)*

En nous basant sur l'analyse-diagnostic précédente, nous proposons dans ce chapitre une représentation conceptuelle de l'oasis de Fatnassa. Dans cette phase de conceptualisation, nous avons décrit et structuré les variables mobilisées pour vérifier l'ensemble des hypothèses établies. La finalité de cette démarche est de définir des indicateurs de performance pour valider l'ensemble des hypothèses dégagées lors de la confrontation de la vision de l'ingénieur à la perception de l'agriculteur mais aussi de la confrontation du discours de l'agriculteur à ses pratiques d'adaptation. De plus, ce modèle conceptuel s'adresse plus spécifiquement aux gestionnaires des systèmes irrigués collectifs : il peut servir à la gestion de leurs données pour suivre le fonctionnement pluriannuel des systèmes irrigués et pour en évaluer les performances.

4.1 Introduction

Les représentations des systèmes irrigués collectifs sont souvent complexes, et conduisent à des procédures lourdes dans l'acquisition des données et dans le traitement de l'information (Sabatier et al., 1991). Mettre en place un modèle conceptuel de gestion de base de données afin d'élaborer des indicateurs de performance, tel est l'objectif de ce chapitre. Dans l'oasis de Fatnassa, nous souhaitons en particulier mettre en place une représentation afin de générer un système d'évaluation permettant de tester les relations de causalités dégagées dans le chapitre précédent. Pour ce faire, nous proposons la mise en place simple d'un système d'évaluation en se basant sur le langage UML (Unified Modeling Language). Le langage UML est un langage en mode objet normalisé par l'OMG (Object Management Group) (OMG, 1999). C'est également un bon moyen de maîtriser la complexité et d'assurer la cohérence du fonctionnement réel d'un système quelconque en termes d'objets, physiques ou non physiques. De même, le langage UML offre la possibilité d'adapter ses concepts à tout type de système (Koo et al., 2003 ; Palluat et al., 2006). Le diagramme de classes est la représentation la plus utilisée en langage objets (Koo et al., 2003 ; Audibert, 2006). Cette représentation peut refléter d'une manière visuelle la structure d'un système donné.

Par rapport au travail proposé par Morlon & Benoit (1990) dans la formalisation opérationnelle des relations entre la parcelle et les faits techniques, nous proposons dans notre démarche d'aller au-delà des faits techniques et de représenter toutes les relations possibles de la parcelle avec son environnement : sol, nappe, irrigation, paysan et culture. Cette phase de conceptualisation est indispensable pour mieux structurer les données dans la perspective d'élaborer des indicateurs d'évaluation des impacts des différents déterminants sur le fonctionnement et sur les performances du système mais aussi de leurs éventuelles interactions. Dans un premier temps les hypothèses sur les dysfonctionnements actuels sont inventoriées en se basant sur l'analyse des contraintes préalablement établie (cf. Chap. 3). Ensuite, les variables à mettre en place pour vérifier l'ensemble des hypothèses sont décrites. Enfin, l'étape suivante consiste en la conceptualisation du périmètre en se basant sur l'organisation et la mise en relation de l'ensemble des variables.

4.2 Hypothèses et dysfonctionnements

4.2.1 Les relations potentielles

La confrontation du diagnostic d'ingénieur pour la modernisation de l'oasis avec la perception des contraintes par les agriculteurs, d'une part, et du discours et des perceptions des agriculteurs avec leurs pratiques d'adaptation, d'autre part, nous ont permis d'identifier l'ensemble des facteurs qui agissent sur les performances des systèmes de culture oasiens (cf. Chap.3 § 3.5). En adoptant la méthode de représentation schématique des contraintes décrite dans le chapitre 3 (§ 3.2.2), nous avons résumé cette analyse critique par l'arbre à problème représenté dans la figure 4.1. Cette représentation illustre toutes les hypothèses sur les relations de causalité du système tel qu'il fonctionne actuellement. Nous avons choisi d'occulter la dimension historique du fonctionnement c.-à-d. la disparition des arbres fruitiers et des cultures maraîchères vu l'impossibilité de vérifier leurs relations de causalité.

L'observation de l'arbre à problème (Fig. 4.1.) montre une principale racine liée à la performance de l'irrigation et une principale branche autour de la performance du palmier dattier. De plus ces deux dimensions ont un rôle important dans chaque système oasien. Nous avons ainsi choisi d'orienter la suite du travail vers l'étude du tour d'eau, et vers l'étude des interactions entre les facteurs du milieu physique et de leur effet sur la performance du palmier dattier.

4.2.2 Faible fréquence du tour d'eau

La première caractéristique de l'oasis de Fatnassa est la faible fréquence du tour d'eau. Un ensemble de déterminants à deux échelles en interaction, l'échelle de l'oasis et l'échelle de la parcelle, sont supposés être à l'origine d'un intervalle d'irrigation très long surtout en saison estivale. Les facteurs déterminants à l'échelle de l'oasis seraient : (i) l'augmentation continue de la surface irriguée et l'intégration progressive des nouvelles extensions pour une capacité fixe du système d'irrigation, et (ii) les dysfonctionnements techniques fréquents (les pannes des pompes, l'entartrage de la conduite des eaux géothermales, les coupures d'électricité, les fuites au niveau des conduites souterraines ou des séguías bétonnées,...). A l'échelle de la parcelle, les irrigations seraient caractérisées par des durées excessives par rapport à la règle théorique (10 h.ha^{-1}). Les déterminants des durées excessives sont supposés être : (i) un débit faible, (ii) la taille de la parcelle, (iii) la stratégie délibérée d'allongement de la durée d'irrigation pour accéder aux eaux gratuites, (iv) le type du système d'irrigation et la qualité de son entretien, (v) le degré d'implication du propriétaire, (vi) la grande infiltrabilité du sol occasionnée par une fréquence élevée du travail du sol et des amendements sableux, (vii) la profondeur et la salinité de la nappe (les agriculteurs déclarent apporter une dose élevée d'eau d'irrigation dans la mesure où « les eaux vivantes chassent les eaux mortes »), et finalement (viii) l'insécurité de retour du prochain tour d'eau pourrait aussi être un facteur d'allongement de la durée d'irrigation.

4.2.3 Faible performance du palmier dattier

L'oasis de Fatnassa est aussi caractérisée par la faible performance du palmier dattier : (i) la conduite de l'irrigation, (ii) la salinité du sol, (iii) l'engorgement en saison hivernale (profondeur de la nappe), (iv) la compaction et la dégradation de la fertilité du sol en terme de fréquence du travail du sol associé aux amendements sableux et organiques, mais aussi (v) les pratiques culturales en relation la conduite de la palmeraie et la densité de plantation des palmiers dattiers sont supposés être les facteurs qui limitent la performance du palmier dattier.

L'ensemble de ces facteurs du milieu physique sont supposés en interaction mais aussi influencés par les pratiques et les stratégies des agriculteurs. En effet, la salinité du sol pourrait être influencée par la conduite de l'irrigation, la profondeur et la salinité de la nappe, et la fréquence des amendements sableux. De même, la salinité et la profondeur de la nappe sont supposées être en relation avec la conduite de l'irrigation.

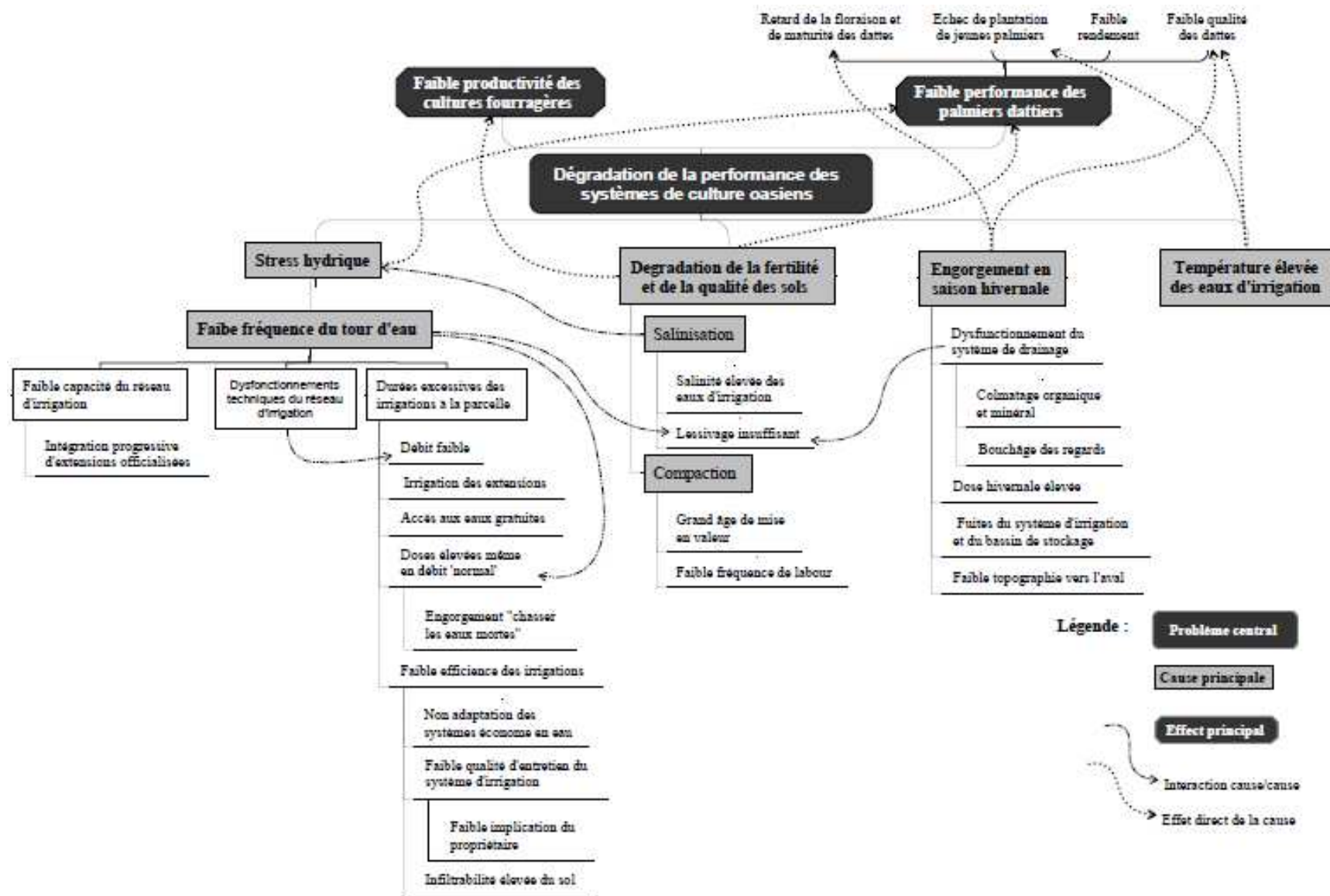


Figure 4.1 : Relations de causalité de la dégradation de la performance du palmier dattier.

4.3 Description des variables et choix de validation

Les variables choisies pour valider l'ensemble des hypothèses décrites ci-dessus, ainsi que la procédure mise en place pour renseigner et valider ces variables sont exposés ci-après.

4.3.1 Les variables d'irrigation

Le tour d'eau a été renseigné sur la base des feuilles du suivi journalier effectué par le GDA de Fatnassa. Sur chaque feuille identifiée par la date d'irrigation, se présente un ensemble de propriétaires organisés par antenne d'irrigation. La durée d'irrigation (en heure et minute) est notée pour chaque irrigant. Le travail consiste à reconstruire le tour d'eau sur chaque antenne.

Ce travail a été accompagné par des investigations de terrain pour attribuer à chaque irrigant et à chaque évènement d'irrigation la parcelle irriguée correspondante. Cette tâche a été rendue possible grâce à la validation, l'actualisation et le géo-référencement du plan parcellaire établi depuis 1984 par le CNEA (CNEA et al., 1984). La *durée d'irrigation* en heure par hectare peut être alors calculée pour chaque évènement d'irrigation de la parcelle correspondante. Il est important de noter que les évènements d'irrigation qui se déroulent sur deux ou trois jours successifs pour la même parcelle comptent pour un seul évènement, et la durée d'irrigation est ainsi définie comme la somme des durées des évènements élémentaires. Cet évènement spécifique est caractérisé par une irrigation nocturne et un accès à l'eau chaude gratuite qui continue à alimenter le système au moment de coupure journalière du pompage des forages d'eau froide. Il est finalement possible d'établir pour chaque parcelle le *nombre d'irrigations* durant la saison hivernale et durant la saison estivale, et le *nombre d'irrigation nocturne avec accès aux eaux chaudes gratuites*. La *fréquence du tour d'eau* peut être déterminée comme le nombre de jour entre deux irrigations successives. Il est ainsi possible de caractériser la fréquence d'irrigation dans l'oasis.

La *surface totale actuellement irriguée* est calculée et sera comparée à la surface officielle déclarée pour chaque antenne afin de caractériser le phénomène d'extension des superficies irriguées.

Le nombre de jours de non approvisionnement en eau de chacune des antennes est déterminé pendant la saison hivernale et la saison estivale afin de caractériser les dysfonctionnements techniques du réseau d'irrigation.

La performance du *système d'irrigation* a été caractérisée pour étudier son impact sur la durée d'irrigation et sur la performance des palmeraies. Les caractéristiques du système d'irrigation définies par le type, la taille des bassins d'irrigation et la qualité d'entretien, ont été renseignées pour chaque parcelle sur la base des observations de terrain.

(i) Type : les bassins d'irrigation sont desservis par une séguia principale qui souvent divise la parcelle en deux (ou plus) dans le sens de longueur. Cette séguia principale est souvent en terre ; pour quelques parcelles elle a été remplacée par une conduite en PVC. La nature de la séguia principale, en terre ou en PVC, définit le type du système d'irrigation.

(ii) La taille du bassin : les bassins d'irrigations sont généralement divisés en six cuvettes (c.f Chap. 2 § Fig. 2.3). Au centre de chaque cuvette se trouve un palmier dattier, et presque toute la surface de la cuvette est mouillée au moment de l'irrigation. Cependant quelques agriculteurs ont réduit la surface mouillée en réduisant la surface de la cuvette par rapport au système traditionnel.

(ii) La qualité d'entretien : le système d'irrigation est généralement entretenu à l'occasion du labour de la parcelle et l'apport des amendements sableux et organiques. Les travaux se traduisent par l'entretien des séguias, le nivellement des cuvettes et l'arrachage des mauvaises herbes.

4.3.2 Les variables du milieu physique

(1) La *salinité du sol* est jugée comme une contrainte majeure qui détermine les pratiques culturales et les performances des systèmes de culture, et qui peut être conditionnée en retour par ces pratiques. Pour caractériser cette variable, nous avons choisi l'échelle de la parcelle et un outil de mesure in situ et rapide, le conductivimètre électromagnétique (EM-38), pour estimer la conductivité électrique globale (EM) du sol. Pour ce faire, cinq répétitions pour chaque position de l'appareil de mesure (position verticale : EM_V, et position horizontale EM_H) (Fig. 4.2) ont été effectuées pour chaque parcelle. Afin de minimiser l'influence de l'état hydrique sur le signal et d'uniformiser la mesure nous avons choisi une période où la fréquence d'irrigation est la plus faible c.-à-d. la période de récolte (novembre et octobre 2007) pour effectuer les mesures de EM38. En cette période, la nappe est située à 125 ± 43 cm (avec une médiane de 117 cm).

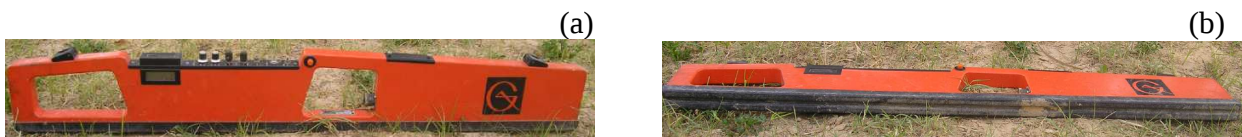


Figure 4.2 : Position verticale (a) et horizontale (b) de l'EM-38.

Pour caler le signal électromagnétique, nous avons essayé de trouver une relation entre l'intensité du signal, la profondeur et la salinité de la nappe et la salinité du sol exprimée en unité standard (dS.m^{-1}). Ces variables sont théoriquement susceptibles d'influencer la mesure EM (Job et al., 1987). En plus, le signal horizontal caractérise le mieux les couches de surface, et celui vertical caractérise le mieux les couches plus en profondeur. En pratique, nous avons choisi 23 points de contrôle répartis sur l'ensemble de l'oasis -correspondant au réseau de piézomètres (cf. Chap. 2 § Fig. 2.2)-. Pour chaque point (i) un profil de sol sur 1.5 m a été réalisé pour déterminer au laboratoire la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CEe) ; (ii) la profondeur (D) et la salinité de la nappe (CEn) ont été mesurées ; et (iii) la salinité a été caractérisée par le EM-38 avec quatre répétitions pour chacune des positions de l'appareil. Les investigations de terrain se sont déroulées en début novembre 2007.

La figure 4.3 montre une grande variabilité verticale (intra-profil) et spatiale (inter-profils) de la salinité du sol. Les facteurs susceptibles d'influencer cette salinité sont la fréquence d'irrigation, la salinité et la profondeur de la nappe.

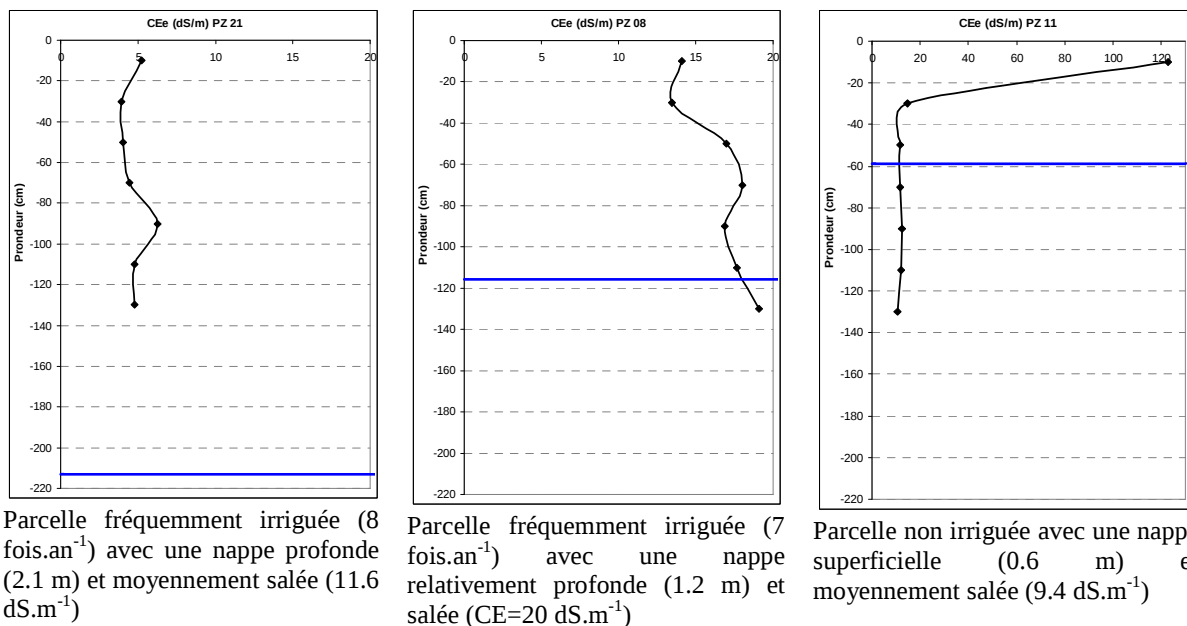


Figure 4.3 : Variabilité du profil salin en fonction de la fréquence d'irrigation et de la profondeur et la salinité de la nappe.

La matrice de corrélation (Tab. 4.1) montre une bonne corrélation du signal vertical (EM_V) et horizontal (EM_H) avec la salinité (CEn) et la profondeur de la nappe (D), et la salinité de sol à partir de 80 cm. Cette matrice confirme la sensibilité du signal aux conditions édaphiques du sol.

Tableau 4.1 : Matrice de corrélation CEe, EM, CEn et D (n=23, r significatif au seuil de 5% si $|r| > 0.42$).

	CEn	D	EM_V	EM_H
CE	--			
D	-0.08	--		
EM_V	0.52	-0.54	--	
EM_H	0.35	-0.66	0.94	--
CEe ₍₀₋₂₀₎	-0.15	-0.34	0.16	0.45
CEe ₍₀₋₄₀₎	-0.12	-0.36	0.23	0.49
CEe ₍₀₋₆₀₎	-0.06	-0.41	0.35	0.59
CEe ₍₀₋₈₀₎	0.01	-0.45	0.47	0.67
CEe ₍₀₋₁₀₀₎	0.06	-0.47	0.56	0.73
CEe ₍₀₋₁₂₀₎	0.11	-0.46	0.60	0.75
CEe ₍₀₋₁₅₀₎	0.15	-0.45	0.64	0.75

Pour caractériser la salinité des couches supérieures du sol tout en minimisant l'effet de la nappe, nous avons utilisé la tranche 0 - 100 cm. L'intensité du signal correspondant à sa position horizontale (équation [1]) sera utilisée ultérieurement pour caractériser un indicateur de salinité du sol.

$$CEe_{(0-100)} (dS.m^{-1}) = 2.56 + (0.123^{**} \times EM_H) - (0.458 \times CEn) + (1.197 \times D) \quad r^2 = 0.57 \quad [1]$$

$$CEe_{(0-100)} (dS.m^{-1}) = 9.384 + (0.073^* \times EM_V) - (0.502 \times CEn) + (2.373 \times D) \quad r^2 = 0.38 \quad [2]$$

* : significatif au seuil de 5% ; ** : significatif au seuil de 1%

(2) Les caractéristiques du sol sont périodiquement régénérées par *des amendements sableux et organiques* accompagnés par un grand labour. Les caractéristiques des amendements (date du dernier ajout, fréquence, et y a-t-il un effet sur la topographie de la parcelle ou non) sont renseignées sur la base des observations de terrain et d'enquêtes effectuées durant l'année agricole 2006-07.

(i) Date du dernier ajout : la présence d'orge et de luzerne témoignent d'un amendement pratiqué pendant l'année en cours, la présence de luzerne avec une bonne qualité d'entretien du système d'irrigation sont le signe d'un amendement de l'année précédente, et la mauvaise qualité d'entretien du système d'irrigation avec ou sans luzerne témoignent d'un amendement pratiqué avant au moins deux ans.

(ii) Fréquence des amendements : les parcelles non irriguées ne sont pas amendées alors que les parcelles dont la qualité du système d'irrigation est très dégradée témoignent de l'absence d'apport d'amendements et de travail du sol. De plus, une enquête a été réalisée au près des agriculteurs pour confirmer les observations de terrain et pour déterminer la fréquence des amendements dans les autres types de parcelles.

(iii) Effet sur la topographie : la surélévation de la topographie locale de certaines parcelles par rapport aux parcelles avoisinantes témoigne d'une fréquence élevée des amendements avec des quantités importantes.

(3) Pour caractériser la contrainte *engorgement* et la *salinité de la nappe*, les investigations de terrain ont été effectuées au cours du mois février 2008. Les caractéristiques de la nappe en cette période sont supposées représentatives de sa position haute en saison hivernale en se basant sur les travaux de Ben Aissa (2006), mais aussi peu variables d'une année à l'autre dans les mêmes conditions d'irrigation, les mêmes conditions climatiques et d'écoulements souterrains. Pour caractériser la nappe, un maillage de 100 m a été appliqué au plan parcellaire. La profondeur et la salinité de la nappe ont été mesurées sur les intersections entre les mailles. Les données acquises au niveau des mailles sont traitées numériquement par des méthodes géostatistiques, en particulier l'interpolation par krigeage. Les figures 4.4 et 4.5 illustrent les variogrammes d'interpolation de profondeur et de salinité utilisés pour générer les interpolations correspondantes sous ArcGIS (9). Les cartes des caractéristiques hivernales de la nappe ont été croisées avec le plan parcellaire actualisé pour extraire une valeur moyenne pondérée de la profondeur minimale et de la salinité de la nappe en saison hivernale pour chaque parcelle élémentaire (Fig. 4.4 et Fig. 4.5).

Variogramme sphérique :
Effet pépite = 0.04 m
Portée = 837 m

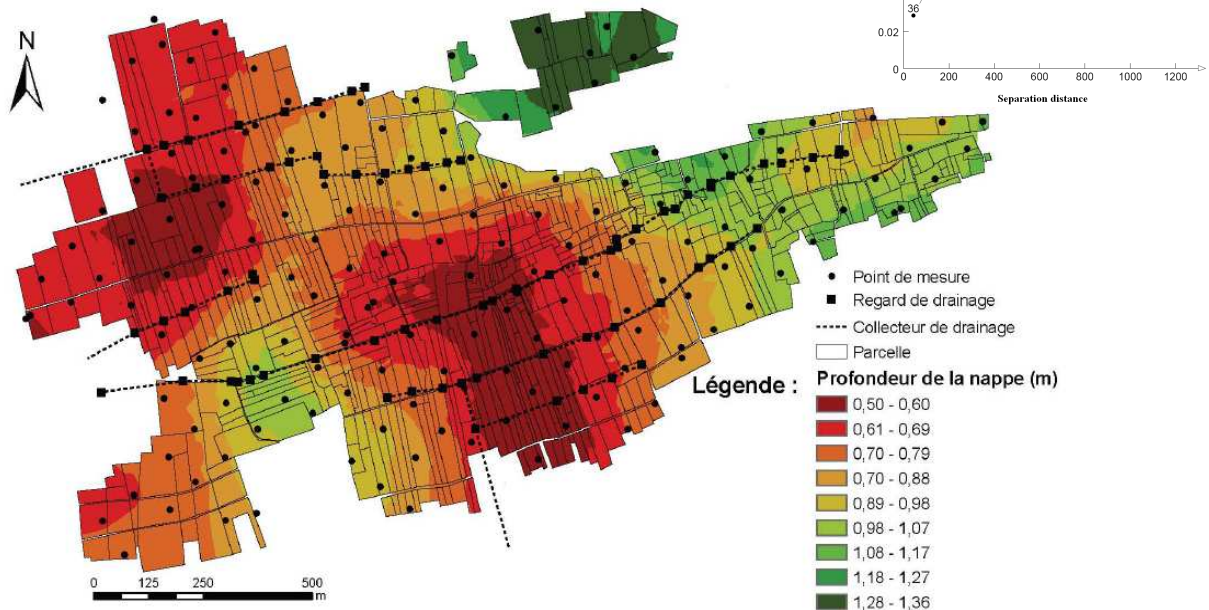


Figure 4.4 : Carte d'interpolation de la profondeur de la nappe et variogramme correspondant ; (Février 2008, n=165 points de contrôle).

Variogramme sphérique :
Effet pépite = 33.08 dS.m⁻¹
Portée = 975 m

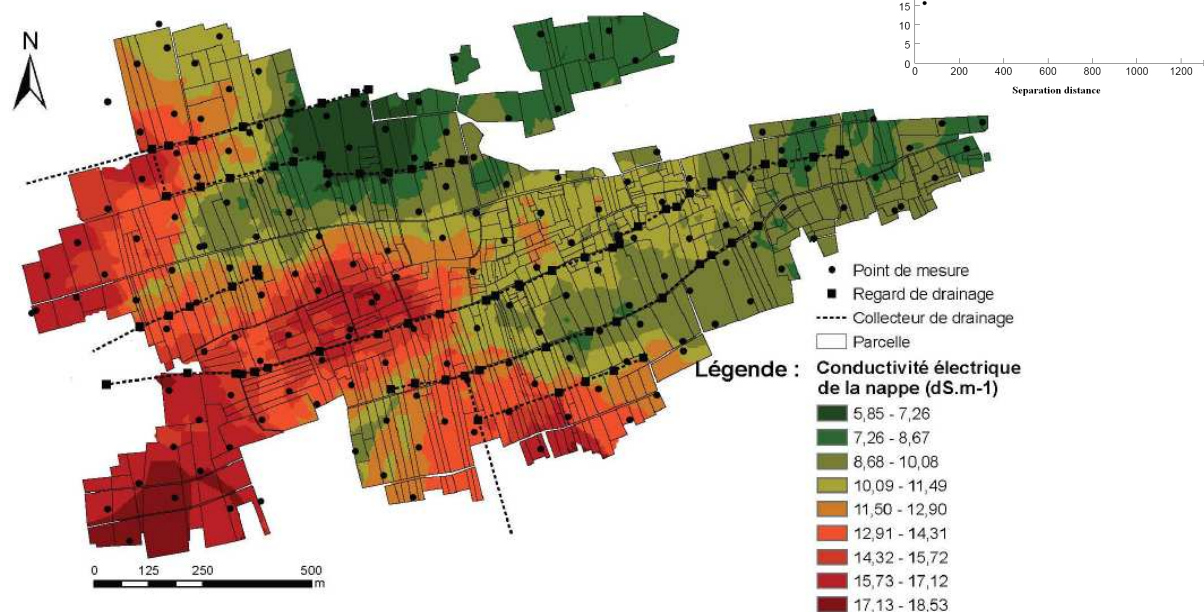


Figure 4.5 : Carte d'interpolation de la conductivité électrique de la nappe et variogramme correspondant ; (Février 2008, n=165 points de contrôle).

4.3.3 Les variables biotiques et modes de conduite des palmeraies

Vu la structure actuelle des systèmes de cultures (disparition des arbres fruitiers et des cultures maraîchères) et les incertitudes sur le rendement de la strate des cultures fourragères, nous avons choisi de caractériser la palmeraie en ne se basant que sur la strate du palmier. Les caractéristiques du système de culture sont : le type de la palmeraie, les dates de début et de fin de plantation, les rendements des variétés plantées et la densité de plantation.

Le type de la palmeraie (Fig. 4.6) est définie sur la base d'observation de terrain où nous avons distingué six types selon :

- *Palmeraie moderne* : la trame originelle des palmiers, visiblement en pleine production (20 à 40 ans), est alignée et composée principalement de Deglet Nour, toutefois quelques pieds de variétés traditionnelles peuvent exister sur les limites des parcelles, un grand investissement dans l'entretien du palmier dattier mais aussi dans le travail du sol et l'entretien du système d'irrigation est visible. Ce type de palmeraie n'est pas généralement dense.
- *Palmeraie traditionnelle* : palmiers plus ou moins alignés avec existence d'une proportion importante des variétés communes, les palmiers sont visiblement âgés, avec la présence de quelques pieds d'arbres soit en intercalaire soit sur les limites, ces palmeraies ont

généralement été créée par l'Etat en 1969 et sont caractérisées par leur faible superficie. Ce type de palmeraie est très dense.

- *Palmeraie non traditionnelle* : palmiers plus ou moins alignés et visiblement moyennement productifs, la strate moyenne est absente, et un investissement correct dans l'entretien du palmier dattier mais aussi dans le travail du sol et l'entretien du système d'irrigation est visible et la densité de plantation est moyenne.
- *Palmeraies à conduite de survie* : les travaux élémentaires de nettoyage du palmier ne sont plus effectués, les palmiers ne bénéficient au mieux que des opérations de pollinisation et de récolte, les mauvaises herbes poussent librement (présence fréquente du diss, chiendent), les limites des cuvettes s'effacent, les autres cultures n'existent pas (ou plus), le travail du sol est rare ou inexistant, et l'activité principale se limite en général à l'irrigation elle-même peut fréquente.
- *Palmeraie jeune* : palmiers à conduite intensive de travail du sol et d'entretien du système d'irrigation et du palmier dattier à monoculture Deglet Nour mais avec de jeunes palmiers (≤ 15 ans).
- *Palmeraie abandonnée* : palmiers non irrigués avec inexistence de toutes les opérations culturales.

L'âge plantation est très hétérogène au sein de l'oasis de Fatnassa mais aussi au sein de la même parcelle. Pour cerner cette hétérogénéité, nous avons choisi de renseigner la date de début de plantation et la date de fin de plantation pour chacune des parcelles sur la base d'entretien avec les agriculteurs que nous avons ensuite confrontés avec des observations de terrain.

Le rendement est considéré comme la variable clé qui caractérise la performance de la palmeraie. Pour accéder à cette information au cours de la récolte de 2006-07, les investigations de terrain se sont basées sur une estimation visuelle du rendement par un acheteur sur pied résidant au village de Fatnassa. Pour ce faire, la procédure consistait en un passage sur toutes les parcelles élémentaires irriguées au moment de la récolte pour :

- compter le nombre de palmiers productifs pour chaque variété : Deglet Nour et Variétés Communes dont principalement la variété 'Allig' (Fig. 1, annexe) ;
pour la variété Deglet Nour : estimer le nombre de plateaux de *dattes branchées de qualité 1* (par palmier si la production des palmiers est visuellement uniforme ou une estimation globale au cas contraire) et le poids des autres catégories de dattes : dattes en vrac (dattes de

Palmeraie moderne



Palmeraie traditionnelle



Figure 4.6 : Les différents types de palmeraies

Palmeraie non traditionnelle



Palmeraie jeune



(Suite Fig. 4 .6) : Les différents types de palmeraies

Palmeraie à conduite de survie



Palmeraie abandonnée



(Suite Fig. 4.6) : Les différents types de palmeraies

- qualité 2), dattes sèches, dattes non pollinisées et déchets utilisés comme aliments du bétail (Fig. 2, annexe) ; et :
- estimer le nombre de caisses de Variétés Communes (il n'y a qu'une seule qualité).

Les parcelles non irriguées ont généralement une production négligeable et est supposée nulle.

Nous avons choisi l'unité 'plateau' (1 plateau $\approx$ 15 kg de dattes branchées Deglet Nour) et "caisse" (1 caisse $\approx$ 30 kg de dattes Allig) parce que les agriculteurs et les acheteurs sur pieds ont l'habitude de la quantification, visuelle ou réelle, de la production en se basant sur cette unité.

Pour valider cette estimation, nous avons recueilli auprès des agriculteurs et des acheteurs sur pieds le nombre de plateaux réellement récoltés pour un échantillon de 42 parcelles élémentaires irriguées réparties sur l'ensemble de l'oasis. Les résultats (Fig. 4.7) montrent une très bonne corrélation entre le rendement estimé et le rendement réel.

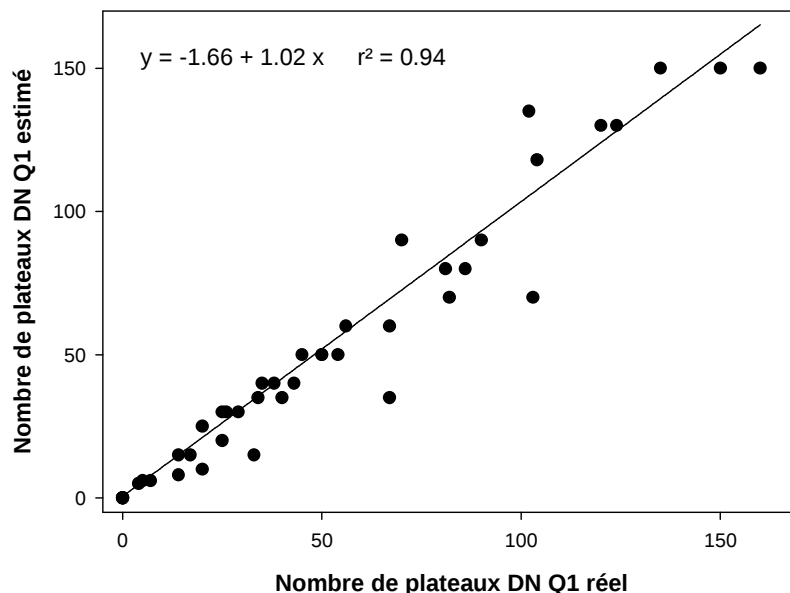


Figure 4.7 : Validation de l'estimation du rendement Deglet Nour en dattes branchées ; (Année agricole 2006-07, n=42).

Nous avons aussi compté le nombre de palmiers dattiers (productifs et non productifs) pour caractériser la *densité de plantation*.

4.3.4 Les variables socio-économiques

Le *degré d'implication du propriétaire* dans la propriété est supposé déterminant quant à la performance de l'irrigation mais aussi la conduite de la palmeraie. Une enquête a été réalisée au cours de l'année 2006-07 pour caractériser différentes variables qui caractérisent cette implication. Il s'agit en particulier du lieu de résidence, de l'activité principale du propriétaire, de

qui décide l'exécution des principaux travaux dans la palmeraie (amendements, toilettage du palmier dattier, pollinisation, suspension et protection des régimes, récolte,...), et de qui irrigue le plus souvent.

La *disponibilité de la main d'œuvre* familiale et le *type de revenus externes* sont aussi renseignés pour chaque exploitation. Les problèmes de trésorerie sont renseignés pour chaque exploitant.

4.4 Restructuration des variables

Les différentes variables décrites ci-dessus ont été réorganisées dans un modèle de gestion de base de données et ensuite renseignées afin de générer des indicateurs d'évaluation des performances de l'oasis.

4.4.1 Conceptualisation du système irrigué

Les notions suivantes sont mobilisées dans cette phase de conceptualisation : classe, attribut et identifiant, association et multiplicité ou cardinalité, héritage ou généralisation et agrégation, package ou paquetage (OMG, 1999 ; Audibert, 2006).

La procédure de conceptualisation consiste tout d'abord à l'inventaire des variables mobilisées pour vérifier l'ensemble des hypothèses et des relations de causalité sus-identifiées. Il s'agit ensuite, de réorganiser l'ensemble de ces variables en des classes. Les variables constituent ainsi les attributs des différentes classes dont un attribut spécifique qui caractérise d'une manière unique chaque objet de classe, c'est l'identifiant. La mise en relation des différentes classes et l'identification des relations et des cardinalités, constitue l'étape d'après.

L'organisation du modèle peut être améliorée par le regroupement des classes dans des packages de même thématique.

La gestion du périmètre oasien de Fatnassa se structure autour de quatre grands ensembles de fonctions (Fig. 3, annexe) à savoir la fonction hydraulique, la fonction environnementale, et deux fonctions qui relèvent directement des agriculteurs : la fonction de production agricole et la disponibilité et les moyens mis en œuvre par l'agriculteur. Le langage UML permet d'identifier plusieurs classes à l'intérieur de chaque fonction. Ces classes sont présentées ci-dessous en caractère *italique*. Le modèle de package et de classes décrit la structure du périmètre oasien de Fatnassa pour une année d'investigation, année agricole 2006-07.

L'élément central de cette représentation est la *parcelle élémentaire*, notée aussi *parcelle*, actuelle unité physique du plan parcellaire. Elle peut être composée d'une ou plusieurs *parcelles de base*

(ancienne unité physique du plan parcellaire). La parcelle élémentaire peut être possédée par 1 *propriétaire*, par contre un propriétaire peut avoir au moins une parcelle élémentaire.

La parcelle élémentaire est le support d'un *système de culture* bien déterminé, et en retour un système de culture à un endroit bien déterminé ne caractérise qu'une seule parcelle élémentaire. Ce système de culture peut être composé de deux catégories à savoir la *variété Deglet Nour* et les *Variétés Communes*.

La parcelle élémentaire est caractérisée par un *sol* et une *nappe*. Par contre à un lieu bien déterminé le sol et la nappe ne caractérisent qu'une seule parcelle élémentaire. Le sol est défini par une classe *amendement* et une classe salinité exprimée en Conductivité *Electro-Magnétique*. (CEM). Alors que la nappe est caractérisée par sa *position haute* en période hivernale.

La *parcelle hydraulique* peut être composée d'une à plusieurs parcelles élémentaires (juxtaposées ou non) correspondant à la durée d'irrigation facturée par le GDA. Par contre une parcelle élémentaire n'appartient qu'à une seule parcelle hydraulique et à 0 parcelle hydraulique si elle n'a pas été irriguée pendant l'année considérée. Pour cette année d'investigation, la parcelle hydraulique peut être irriguée au moins une fois selon un *tour d'eau*. A un moment donné, le tour d'eau ne caractérise qu'une seule parcelle hydraulique. Pour alimenter les parcelles selon ce tour d'eau, il faut un *approvisionnement en eau* ou aucun approvisionnement si aucun tour d'eau n'est desservi.

4.4.2 Implémentation physique et base de données

Le modèle logique est préalable à l'implémentation physique de la base de données. Dans ce modèle, les relations d'association et d'agrégation sont décodées par la migration des identifiants d'une classe à l'autre en fonction des cardinalités, et par la migration de tous les attributs de la classe mère à la classe fille en cas de relation d'héritage. La base de données Access est en suite générée à partir du modèle physique. Les classes deviennent alors les tables de la base de données et les attributs deviennent les variables à renseigner. Chaque table doit avoir une clé primaire (l'identifiant de la classe correspondante) et une ou plusieurs clés secondaires (identifiants des classes reliées à la classe correspondante). L'intégrité référentielle doit être appliquée à la base de données pour vérifier les relations entre tables et pour contrôler la saisie des données quand il s'agit de la multiplicité de la clé primaire.

Tout comme le système conceptuel, la base de données est organisée autour de la parcelle élémentaire. La base de données a été mise en relation avec le système d'information géographique pour vérifier la structure spatiale de certains indicateurs.

4.5 Conclusion

La démarche suivie nous a permis d'expliciter la structure du système irrigué. Elle offre un cadre d'analyse intéressant dans la structuration des variables afin de faciliter la génération d'indicateurs. Le modèle conceptuel de gestion de base de données proposé a la particularité d'être centré autour de la parcelle agricole qui est considérée comme un tout en interaction avec son milieu c.-à-d. le sol, la nappe, l'agriculteur et les cultures. En plus, le recours à des méthodes de mesure rapides facilite l'accès à la donnée. Cet outil simple et pertinent peut être mis en place et exploité par le gestionnaire de l'aménagement pour décrire les performances du système collectif. La finalité de cet outil est de faciliter la génération d'indicateurs décrivant les performances actuelles du système. En plus, la possibilité de pouvoir représenter spatialement certains indicateurs facilite le dialogue avec les agriculteurs dans une perspective de stimuler la réflexion sur les évolutions à conduire et d'adapter les plans d'action à la situation locale réelle.

Ce système d'évaluation peut être orienté pour aborder spécifiquement deux principaux problèmes qui affectent les performances de l'oasis : (i) la faible performance de l'irrigation liée à la faible fréquence du tour d'eau sous des contraintes techniques (dysfonctionnements du réseau), tactiques (extension continue des superficies irriguées), environnementales (salinité et engorgement) mais aussi sous certaines pratiques des agriculteurs induisant des irrigations qui pourraient être qualifiées d'inefficientes (choix et qualité d'entretien du système d'irrigation) ; et (ii) la faible performance de la strate du palmier dattier sous l'influence l'interaction des contraintes du milieu physique (conduite de l'irrigation, salinité et engorgement) mais aussi de certaines pratiques (les amendements sableux et les irrigations hivernales) et stratégies des agriculteurs (la conduite de la palmeraie). La démarche méthodologique permettant de valider les hypothétiques faibles performances ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans la partie B (cf. Chap. 5 et 6) ci-après.

*Partie B L'eau et les dattes : Evaluation des performances
individuelle et collective de l'irrigation & Déterminants de la
performance des palmeraies*

Chapitre 5 : Pratiques individuelles versus gestion collective de l'irrigation

«...pour que ce système fonctionne correctement, il fallait que se maintienne un assez fort consensus intra-communautaire ».
Le pouvoir de l'eau dans le sud-Tunisien.
Baduel A. & Baduel P. (1980)

Ce chapitre propose une évaluation de l'influence spécifique des interactions *des pratiques individuelles et de la gestion collective* de l'irrigation sur les performances de l'irrigation exprimée en terme de fréquence de l'irrigation. Il a fait l'objet d'un article rédigé en anglais et soumis pour publication à la revue *Irrigation and drainage* : Ghazouani W., Marlet S., Mekki I. & Vidal A. (2010). Farmers' practices and community-management of irrigation: Why do they not match in Fatnassa oasis (South Tunisia)? Comme pour le cas du chapitre 3 nous avons inséré l'article en anglais complété par un résumé et une conclusion en français.

Résumé

Les périmètres irrigués collectifs sont communément confrontés à de faibles performances de l'irrigation à l'échelle de l'aménagement. Une étude détaillée a été réalisée dans un périmètre oasien du sud tunisien pour évaluer les performances de la gestion de l'irrigation à l'échelle de l'oasis et de la parcelle. Les données ont été collectées auprès de l'association des usagers de l'eau et sur la base d'une vaste campagne d'enquêtes et d'observations afin de quantifier les causes des faibles performances précédemment identifiées (Ghazouani et al., 2009). A l'échelle de l'oasis, les résultats montrent que la durée du tour d'eau excède le double de celui prévus par les règles collectives (19 à 21 jours). La principale cause est la durée excessive des irrigations qui atteint presque le double de la règle de 10 h.ha^{-1} , due à des pratiques individuelles inappropriées à l'échelle de la parcelle. L'influence modérée de l'extension des superficies irriguées et des dysfonctionnements techniques du réseau est par ailleurs compensée par l'absence ou l'annulation occasionnelle de l'irrigation dans certaines parcelles. A l'échelle de la parcelle, les durées excessives des irrigations sont le résultat d'un effet conjugué des parcelles de petite taille, du mauvais entretien du système d'irrigation, des irrigations nocturnes sans surveillance et de la faible implication du propriétaire. Cette situation met l'accent sur l'efficiencia et la durabilité des systèmes irrigués quand les agriculteurs ne respectent pas les règles collectives et étendent les plantations de palmiers. De plus, la situation souligne le manque d'équité qui restreint le soutien

apporté par les agriculteurs à l'association des usagers et la stricte application des règles de gestion. Ces résultats devraient permettre d'identifier une approche appropriée et conduire à des changements positifs dans la gestion des systèmes irrigués collectifs.

5.1 Introduction

Whereas private irrigation schemes have proved their ability to achieve high performance in arid and semi-arid regions, community-managed irrigation schemes often fail to achieve expected outcomes (Penning de Vries et al., 2005; Marlet et al., 2006). “In a community managed irrigation system, users are in control of and realize such different tasks as water distribution, infrastructure maintenance, conflict resolution and establishment of norms to regulate and oversee irrigation related activity” (Beccar et al., 2002). In such systems, the water users are mutually dependent and lose individual control (Bromley, 1991). When irrigation is organized according to a rotational delivery with respect to allocation rules, constrained scheduling and inadequate application of the available water to different crops over irrigation seasons can affect the productivity of irrigated land (Tyagi et al., 2005).

Besides agronomic, hydraulic and economic aspects, community-managed irrigation emphasizes the mismatch between individual farmers' practices and collective water allocation rules (Fayse, 2005; Ghazouani et al., 2009). Even in old community-managed irrigation systems, state interventions or rapid technical, economic or social transformations can upset the balance created by ingenious irrigation arrangements and tend to reinforce individual strategies. Irrigation assessment is commonly defined as the measured levels of achievement in terms of one or several parameters which are chosen as indicators both at scheme and farm levels (Abernethy, 1989).

Irrigation assessment at scheme level usually focuses on a limited set of key performance indicators related to water delivery and distribution efficiency, water balance and water productivity (Sarma & Rao, 1997; Isidoro et al., 2004; Phengphaengsy & Okudaira 2008), and is sometimes extended to adequacy, equity, reliability, flexibility, productivity and sustainability (Gorantiwar & Smout, 2005). Other approaches -including benchmarking- are based on comparative indicators establishing whether one irrigation system is more or less efficient than another and evaluating the gap between current and achievable performances (e.g. Kloezen & Garcés-Restrepo, 1998; Malano & Burton, 2001). Others emphasize the need for holistic performance assessment to improve systems operation, assess progress towards strategic goals, diagnose constraints, better understand the determinants of performance, compare the

performance of the scheme with that of other schemes, or to compare the performance of the scheme in space and over time (Burton et al., 2000). On-farm management is also frequently assessed through application efficiency, distribution uniformity and other technical aspects (e.g. Horst et al., 2005; Juana et al., 2007; Pereira et al., 2007). The assessment is sometimes extended from hydraulic and agronomic to socioeconomic, environmental and organisational issues (e.g. Clemmens et al., 2000; Bekele & Tilahun, 2006; Norman et al., 2008).

Only a few studies have addressed water users' and community levels for the assessment of irrigation performances (e.g. Vidal et al., 2004), coordinating maintenance (Vandersypen et al., 2009), stressing the importance of fairness for sustainable irrigation management (Tanaka & Sato, 2005), relating water distribution rules and water distribution performance (Brewer et al., 1997), relating farmers' practices to water use efficiency (Watson & Drysdale, 2005), or studying the effectiveness of the traditional rotational irrigation delivery system at the farm level (Zardari & Cordery, 2009).

Although assessment of community-managed irrigation schemes is not new, the relationships between irrigation performances at farm and scheme levels are rarely tackled. Above all, these commonly used approaches do not enable identification of the real root causes that hinder effective community-management of irrigation. The present study sought to narrow these gaps by conducting a comprehensive assessment of irrigation with regard to the relationship between on-field irrigation practices and community-managed irrigation. The aim was to evaluate how farmers' practices impact the rotational irrigation delivery system and, in return, how the rotational irrigation delivery system influences farmers' practices. We focused both on the importance of individual practices and respect for the collective water allocation rules in assessing irrigation performance in community-managed irrigation schemes.

The rotational irrigation delivery system was monitored for one year and compared with the expected outcome. Based on a previous study of farmers' perceptions of existing constraints including the low frequency of water delivery turns (Ghazouani et al., 2009), the influence of each of the related causes was analyzed. The results of the study should allow farmers and extensions services to identify and implement appropriate solutions and messages for participatory action planning.

5.2 Data and analyses

Based on farmers' perceptions, Ghazouani et al. (2009) established a causal relationship responsible for the actual low frequency of the water delivery turns. At irrigation scheme level, the water delivery turn would be affected by irrigation duration of the irrigated plots, extension of date palm plantation and technical dysfunctions of the irrigation network. At field scale, irrigation duration was supposed to be affected by some farmers' practices especially lengthened night irrigation events, poor maintenance of the irrigation system and poor farmer's involvement, and some environmental conditions like watertable depth, salinity and soil permeability. The irrigation interval was also supposed to impact the irrigation duration when farmers' tend to increase irrigation duration to compensate the low irrigation frequency. In order to analyze the difference between farmers' statements and actual performances, a set of variables was selected and indicators were developed and implemented during the agricultural year 2006-07.

The date and duration of the 2,836 irrigation events on 419 plots were taken from farmers' data monitored by the Water Users Association for irrigation water fees. For each plot, irrigation intervals were calculated as the number of days between two successive irrigation events. The actual irrigated area of each plot was updated from a former land registration (CNEA, 1984). The durations of the irrigation events were transformed according the actual irrigated areas and expressed in $\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}$. It should be noted that successive irrigation events over a period two or three days were counted as one event and the irrigation duration of these events was summed. These irrigation events were qualified as "access to free water events" or "night irrigation events". A ratio between the "night irrigation events" and the total irrigation events was calculated for each plot. Some irrigation events were also cancelled and some plots are temporarily abandoned. Based on the irrigated area, a ratio between the cancelled irrigation events and the allowed rotations was calculated for each sector and each season. Two-way analyses of variance were performed to calculate the least-square means of the irrigation intervals and the irrigation durations in relation to the winter and summer seasons and the three irrigation sectors.

At field scale, investigations were undertaken to characterize the irrigation system according to: water distribution by earthen *seguías* or PVC pipes, appraisal of maintenance quality (land levelling, building irrigation basins, weeding), the size of the irrigation basins, and the date of the last supply of sand. Second, an extensive survey of land owners was also conducted to characterize farmers' involvement based on the identification of their main activities (agriculture or not), residence (local or elsewhere), and their function as decision makers and/or irrigation

practitioners. And finally, a network of 165 observation wells (grid cells of 100 m x 100 m) was used to characterize the depth and the salinity of the shallow watertable in February or March 2008. The data were interpolated by kriging using ArcGis 9 software (Johnston et al., 2001). The average watertable depth and salinity were calculated for each field.

In the first step, nonparametric one-way analysis of variance (Kruskal-Wallis test) was performed, because of the non-normality of the population distribution (Leterme et al., 2006), to calculate the means of irrigation duration in relation to classes of actual field size, the “night irrigation events” ratio, the irrigation system, the farmer’s involvement, watertable depth and salinity, number of irrigation events and the date of the last supply of sand. When the corresponding analysis of variance was statistically significant, the factor concerned was retained for further analysis. If the means were not statistically different, some classes were combined. In the second step, a General Linear Model of irrigation duration was performed, including the significant variables and their two- and three-order interactions. Data were analysed using Minitab software (version 15).

5.3 Results

5.3.1 Irrigation interval

Figure 5.1 shows variations in the irrigation intervals for all irrigation events as a function of the three sectors for the agricultural year 2006-07. The lower boundary line illustrates the irrigation rotation trend. The dots located above the lower boundary line represent cancelled irrigation events. The first irrigation represents a specific event after harvesting when irrigation was stopped while the land was ploughed, sand and manure were applied, and irrigation basins were leveled and built. At this stage and in the following winter season, the rotational irrigation delivery system was not regular and depended on each farmer’s demand and on maintenance of the collective irrigation network. In the winter season, a maximum of 3.30, 3.45 and 3.47 rotations took place in sectors 3, 1 and 2, respectively. Table 5.1 shows that (i) irrigation was interrupted for only 18 days in sector 2 in contrast to 49 days in sector 3, and 56 days in sector 1, and (ii) 46%, 12% and 22% of the irrigated area were cancelled in sector 1, sector 2 and sector 3, respectively. Due to the larger irrigated area, sector 2 was preferentially supplied and the rotational irrigation delivery system was implemented earlier.

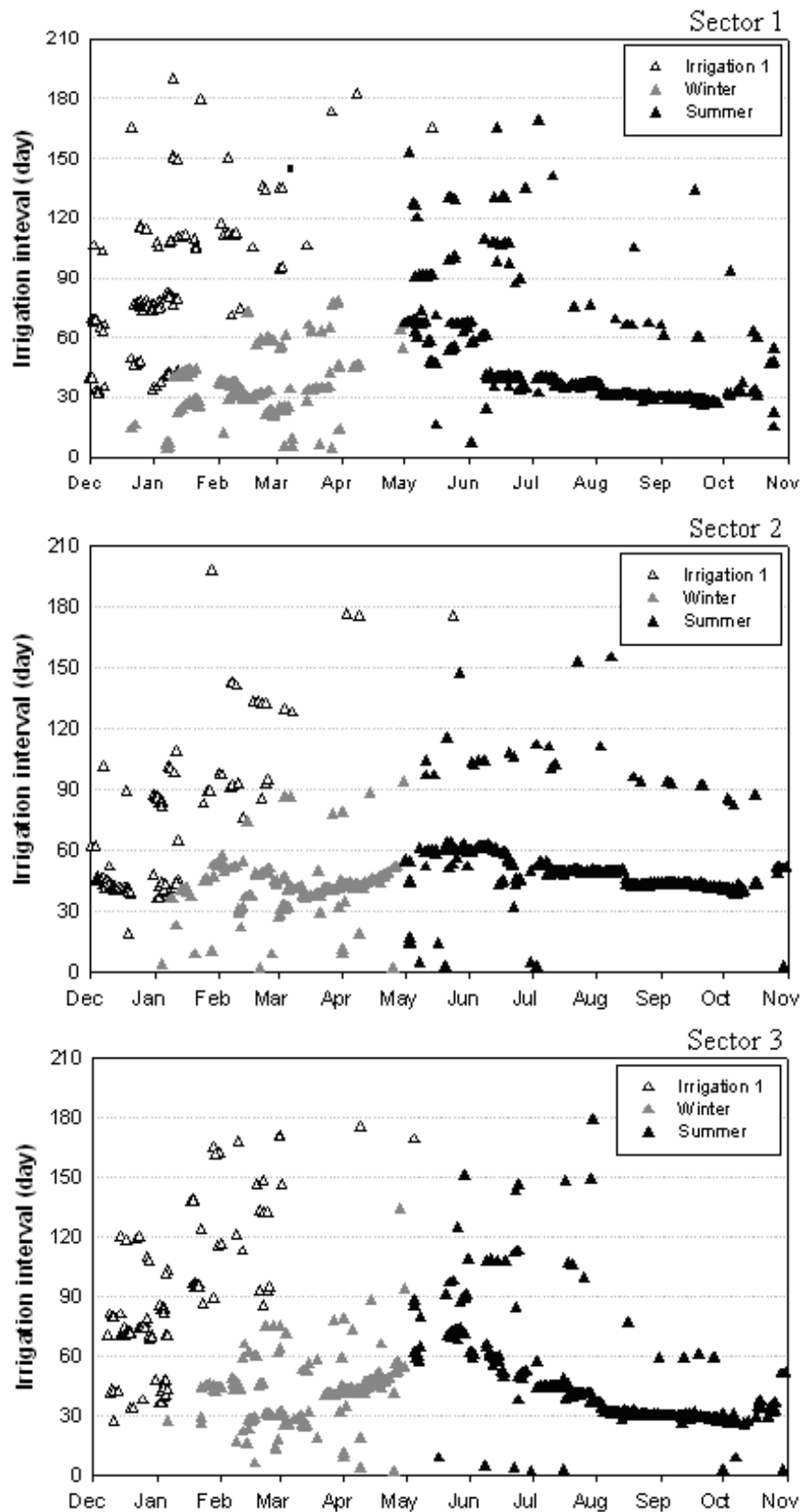


Figure 5.1: Evolution of irrigation intervals during the agricultural year 2006-07 in the three irrigated sectors of Fatnassa oasis.

In the summer season (May - October), irrigation became regular and a rotation was observed within each sector. There were only 3.75 rotations in sector 2 compared with 4.64 rotations in sector 1 and 4.74 in sector 3. Even when water requirements were high, farmers cancelled at least one irrigation event corresponding on 5, 3 and 6% of the total irrigated area in sectors 1, 2 and 3, respectively. The rotation intervals began high and gradually decreased from 60 to 45 days in sector 2; and from 70 to 30 days in sectors 1 and 3. The initial higher intervals in S1 and S3 were due to winter breaks in the water supply in April and May (Fig. 5.1). Over the summer peak season (May to September), technical problems led to a break in irrigation for 13, 12 and 24 days in sectors 1, 2 and 3, respectively.

Variance analysis showed significant differences in the irrigation intervals between sectors, seasons (first irrigation event, winter and summer), and their interactions (Table 5.1). Generally, the first irrigation event occurred earlier in sector 2 (72 days) than in sectors 1 and 3 (92 and 89 days, respectively). Sector 1 had a shorter irrigation interval than sector 3 and sector 2, both in the winter and summer seasons. In sector 2, the interval was significantly longer than in sectors 1 and 3 during the summer season when it exceeded 120% of the expected rotation. All pairwise comparison procedures within each sector showed significant differences between the seasons except in sector 3.

5.3.2 *Influence of the irrigated area*

Today, date palm plantations cover 137.44 ha compared with the 112.46 ha officially used to establish a rotation of 19 to 21 days based on the irrigation duration of 10 h.ha⁻¹. On the other hand, the actual irrigated area was only 123.42 ha because 81 fields were completely abandoned. Subsequently the irrigated area increased by 33% in sector 2, by 6% in sector 3, and decreased by 12% in sector 1 where the village of Fatnassa and sand dunes hindered the extension of plantations (Table 5.1).

5.3.3 *Influence of the irrigation duration*

For the 2,836 irrigation events, variance analysis of irrigation durations showed significant differences between sectors, but no significant differences between seasons. Mean irrigation durations were 19.6, 17.6 and 17.9 h.ha⁻¹ in sectors 1, 2 and 3, respectively. Sector 1 had the longest summer irrigation duration (20.2 h.ha⁻¹) compared with 17.5 and 16.6 h.ha⁻¹ in sectors 2 and 3, respectively (Table 5.1).

Table 5.1: Mean indicators of irrigation performance in Fatnassa oasis (2,836 irrigation events during the agricultural year 2006-07 for n=419 irrigated plots).

Sector	Expected and actual irrigation interval (days)			Expected and actual irrigation duration (h.ha ⁻¹)			Official and actual irrigated area (ha)		Cancelled irrigation events ratio (ha.ha ⁻¹)		Irrigation break (days)	
	Rules	Summer	Winter	Rules	Summer	Winter	Official	Actual	Summer	Winter	Summer	Winter
S1	20	44 (+120%)	36 (+80%)	10	20.2 (+102%)	18.9 (+89%)	37.5	33.1 (-12%)	0.05	0.46	13	56
S2	21	52 (+148%)	43 (+105%)	10	17.5 (+75%)	17.7 (+77%)	39.1	52.1 (+33%)	0.03	0.12	12	18
S3	19	45 (+137%)	41 (+116%)	10	16.6 (+66%)	19.2 (+92%)	35.9	38.25 (+6%)	0.06	0.22	24	49

We then compared irrigation duration per plot with the predetermined rules for water management. Figure 5.2 shows that only 7.1% of the 196 fields in sector 1, 12.1% of the 124 fields in sector 2 and 21.2% of the 99 fields in sector 3 complied with the current rule of 10 h.ha⁻¹; while 75.5% of the fields in sector 1, 65.3% in sector 2 and 60.6% in sector 3 exceeded the former rule of 14 h.ha⁻¹.

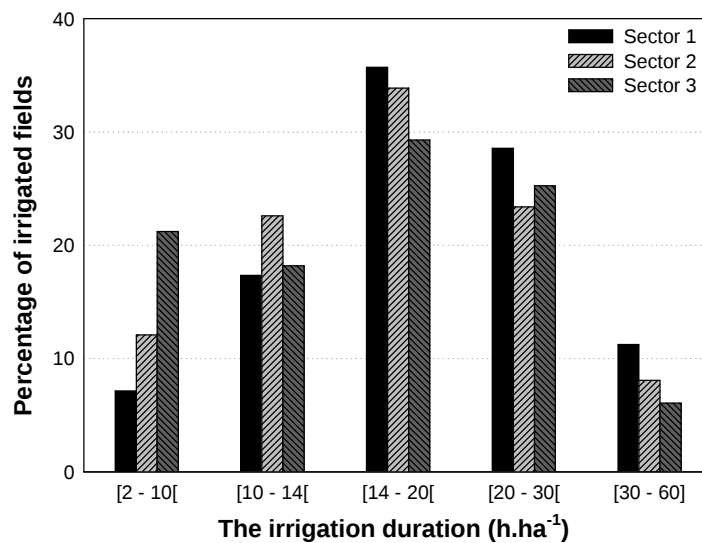


Figure 5.2: Histogram of irrigation duration with respect to the current rule of 10 h.ha⁻¹ and the former rule of 14 h.ha⁻¹ (n=419, 2006-07).

5.3.4 Root causes of the high irrigation durations

The primary variance analyses (Table 5.2) showed significant differences in irrigation duration with respect to field size, the night irrigation event ratio, the irrigation system, the farmer's involvement, and the depth of the watertable, but no significant differences in irrigation duration with respect to groundwater salinity, the number of irrigation events and the date of the last supply of sand. The non-significant variables were rejected and the significant indicators were included in the General Linear Model (Table 5.3) whose results are presented below. The depth of the watertable was not significant and was thus not included in the GLM.

5.3.4.1 Influence of field size and night irrigation events ratio

The size of the fields ranged from 0.01 to 2.65 ha, and was characterized by high division: 29.1% of irrigated fields comprised less than 0.1 ha, 62.8% less than 0.25 ha, and only 4.1% were more than 1 ha in size. The mean irrigated area of the oasis was 0.29 ha. The mean irrigation duration

decreased very significantly from 20.5 h.ha⁻¹ (below 0.25 ha) to 17.4 (from 0.25 to 0.5 ha), and to 12.7 h.ha⁻¹ (above 0.5 ha) (Fig. 5.3 & Fig. 4, annexe).

Table 5.2: Mean irrigation duration (h.ha⁻¹) for different sources of variation at the field level.

One-way analyses of variance using the Kruskal-Wallis' method and the pairwise multiple comparisons using Dunn's method (n=419, 2006-07).

Sources of variation	n	Irrigation duration (h.ha ⁻¹)
Actual field size (***)		
- SA<0.1 ha	122	19.6 ^a
- 0.1≤SA<0.25 ha	141	17.9 ^{ab}
- 0.25≤SA<0.50 ha	89	16 ^b
- 0.50≤SA<1 ha	50	13.6 ^b
- SA≥1 ha	17	9.8 ^b
Night irrigation events (*)		
- No event (R=0)	225	17.2 ^{ab}
- Occasional events (0<R<0.3)	111	17.4 ^a
- Frequent events (R≥0.3)	83	15.5 ^b
Irrigation system (***)		
- Traditional small basins & good maintenance	7	11.3 ^a
- Traditional large basins & good maintenance	176	13.4 ^a
- Improved system with PVC pipes	32	13.4 ^a
- Traditional & weak maintenance	204	20.2 ^b
Farmer's involvement (*): Manager/Irrigation Operator		
- Owner/Owner	148	16.7
- Owner/Family member	83	16.7
- Owner/Agricultural worker	30	18.2
- Else/Family member	107	19.4
- Else/Agricultural worker	51	19.1
Watertable depth (*)		
- Shallow (0.55 to 0.75 m)	180	16.1 ^a
- Medium (0.75 to 1 m)	147	17.2 ^{ab}
- Deep (1 to 1.31 m)	92	18 ^b
Water table salinity (NS)		
- CE<8 dS.m ⁻¹	34	16.8
- 8≤CE<12 dS.m ⁻¹	284	17.4
- 12≤CE<16 dS.m ⁻¹	80	15.9
- CE≥16 dS.m ⁻¹	21	15.8
Number of irrigation events (NS)		
- Low (2 to 4 times)	38	18
- Medium (5 to 6 times)	114	16.9
- High (7 to 10 times)	267	17.1
Last sand supply (NS)		
- Before 2006	258	17.2
- 2006	43	17.2
- 2007	73	16.7
- 2006 or 2007	45	16.8

* Significant at $p_v<0.05$, *** significant at $p_v<0.001$, NS non-significant

^{a,b} Significant differences at $p_v<0.05$

Table 5.3: Variance analysis of irrigation duration (h.ha⁻¹) at the field level: General Linear Model, (r²=0.41, n= 419, 2006-07).

Indicators and modalities	Actual field size (AFS) (ha): [0.01-0.25[; [0.25-0.5[; [0.5-2.65] Night irrigation events ratio (NIR): R=0; 0<R<0.3; R≥0.3 Irrigation system (IS): Improved and good maintenance; weak maintenance Farmer's Involvement (FI): High commitment; Poor involvement				
Source of variance	DF	Sum of squares	Mean square	F	p_v
Model	32	11,930.02	372.81	8.22	<0.001***
Main effects					
AFS	2	1,026.84	513.42	11.32	<0.001***
NIR	2	387.02	193.51	4.27	0.015*
IS	1	1,848.22	1848.22	40.76	<0.001***
FC	1	225.78	225.78	4.98	0.026*
Interactions					
AFS x NIR	4	514.34	128.58	2.84	0.024*
AFS x IS	2	32.95	16.48	0.36	0.696
AFS x FC	2	340.02	170.01	3.75	0.024*
NIR x IS	2	187.99	93.99	2.07	0.127
NIR x FC	2	64.47	32.24	0.71	0.492
IS x FC	1	442.60	442.60	9.76	0.002**
AFS x NIR x IS	3	70.52	23.52	0.52	0.670
AFS x IS x FC	2	148.38	74.19	1.64	0.196
NIR x IS x FC	2	295.08	147.54	3.25	0.04*
AFS x NIR x FC	3	175.22	58.41	1.29	0.278
AFS x NIR x IS x FC	3	166.19	55.40	1.22	0.302
Residual	386	17,502.03	45.34		
Total	418	29,432.05			

* Significant at $p_v < 0.05$, ** significant at $p_v < 0.01$, *** significant at $p_v < 0.001$

The night irrigation events ratio ranged from 0 to 1 and during the agricultural year 2006-07; 46.3% of the plots were irrigated at night at least once and 19.8% were characterized by a ratio of more than 0.3. The mean irrigation duration increased significantly from 14.4 h.ha⁻¹ with no night irrigation events, to 17.9 h.ha⁻¹ with occasional night irrigation events (ratio <0.3), and to 18.4 h.ha⁻¹ with frequent night irrigation events (ratio ≥0.3) (Fig. 5.3).

The interaction between field size and the night irrigation events ratio was also significant (Table 5.3). For the larger irrigated fields (more than 0.5 ha), the irrigation duration was sensitive to the night irrigation events ratio. The mean irrigation duration varied from only 9.1 h.ha⁻¹ with no night irrigation events, to 13.5 h.ha⁻¹ with occasional night irrigation events, and reached 15.6 h.ha⁻¹ with frequent night irrigation events which prevailed (68% of large plots) because irrigation continued for long periods in the larger plots. Occasional night irrigation events also

led to a significant increase in irrigation duration from 18.9 to 23.7 h.ha⁻¹ for the smallest plots where night irrigation events were relatively rare (30% of the smallest plots). On the other hand, irrigation duration was more sensitive to plot size in the absence of night irrigation events and decreased from 18.9 to 15.2, and to 9.1 h.ha⁻¹ for low, medium and large fields, respectively. When night irrigation events occurred, the size of the field appeared to have less effect, except for occasional night irrigation events in the smallest fields, when irrigation duration was significantly higher.

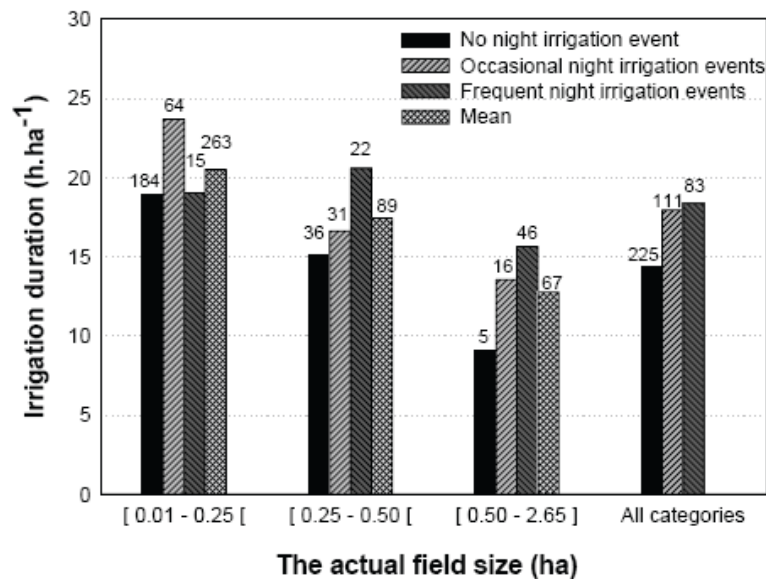


Figure 5.3: Mean irrigation duration according to field size and the frequency of night irrigation events (n=419, 2006-07).

5.3.4.2 Influence of field size and farmer's involvement

Two types of farmer's involvement were also distinguished according to land tenure and who was actually responsible for irrigation. Mean irrigation durations were significantly lower when the owner was present and he or his family was responsible for irrigating (15.8 h.ha⁻¹), which is referred to as high involvement, than when a worker was entrusted with irrigation or when the owner delegated farm management (18 h.ha⁻¹), which is referred to as poor involvement in 44.9% of the irrigated plots.

The differences between poor and high farmer's involvement were particularly high for the smallest fields (<0.25 ha) but not significant for the largest fields (>0.25 ha). In other words, irrigation duration was very sensitive to field size when the farmer was poorly involved. It decreased from 23.4 (<0.25 ha) to 17.9 (from 0.25 to 0.5 ha), and to 12.8 h.ha⁻¹ (>0.5 ha). Conversely, mean irrigation duration did not differ significantly with respect to field size when the farmers were highly involved (Fig. 5.4).

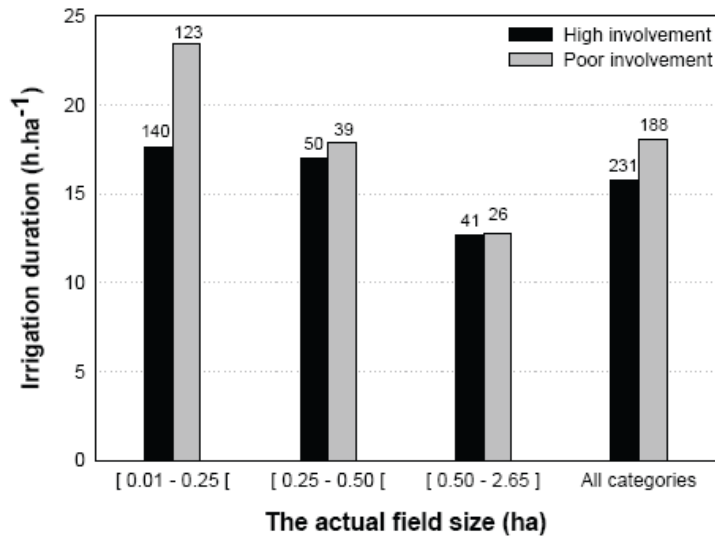


Figure 5.4: Mean irrigation duration according to field size and farmer's involvement (n=419, 2006-07).

5.3.4.3 Influence of irrigation system, farmer's involvement and night irrigation events

At the field level, two types of irrigation system were differentiated according to the way water was distributed and the quality of maintenance. Mean irrigation durations were very significantly higher with the traditional earthen seguias and poor maintenance of irrigation basins (19.8 h.ha⁻¹), referred to as “damaged irrigation system”, than with distribution through PVC pipes or good maintenance (14 h.ha⁻¹), referred to as “improved irrigation system”. The damaged irrigation system was observed in 48.7% of the irrigated fields (Fig. 5.5 (a)).

The interaction between the irrigation system and the farmer's involvement was highly significant (Table 5.3, Fig. 5.5). Mean irrigation durations were particularly increased from 13.8 h.ha⁻¹ with an improved irrigation system to 22.2 h.ha⁻¹ with a damaged irrigation system when the farmers were poorly involved. This increase in the irrigation duration was only from 14.2 to 17.3 h.ha⁻¹ when the farmers were highly involved. In other words, the mean irrigation durations only increased from 17.3 to 22.2 h.ha⁻¹ due to low farmers' involvement in the case of a damaged irrigation system.

The interaction between the irrigation system, the farmer's involvement and the night irrigation events ratio was also significant (Table 6.3). This analysis revealed that the mean irrigation durations increased from 18.6 to 22.0, and to 26.1 h.ha⁻¹ with an increase in the night irrigation events ratio when both the irrigation system was damaged and the farmers were poorly involved (Fig. 5.5(b)). In contrast, the increase in the night irrigation events ratio did not affect irrigation

duration in the case of an improved irrigation system, or when the farmers were highly involved (Fig. 5.5(c)).

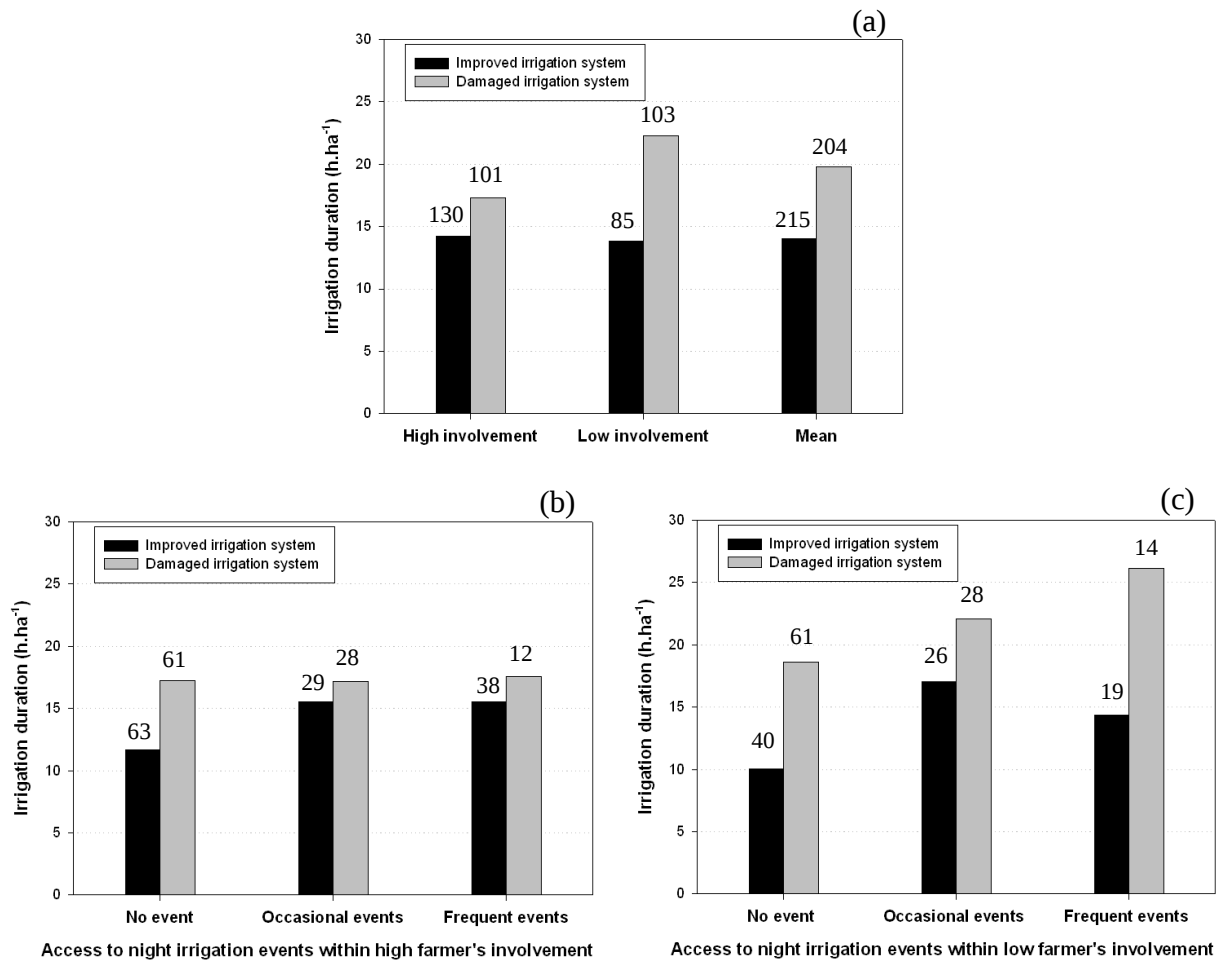


Figure 5.5: Mean irrigation duration according to irrigation system, frequency of night irrigation events, and farmer's involvement (n=419, 2006-07).

5.4 Discussion

While the previous study only analyzed constraints through farmers' perceptions (Ghazouani et al., 2009), the present study enabled the causes of lengthening irrigation rotation in Fatnassa oasis to be assessed and classified. The main cause was a considerable increase in irrigation duration which was almost double the expected duration at field level. The influence of the extension of date palm plantation and the breaks in irrigation were less important and largely compensated by the number of abandoned plots or the cancellation of some irrigation events. The environmental constraints (salinity and waterlogging) did not affect irrigation practices. The increase in irrigation duration resulted especially from a complex combination of causes related to farmers' practices.

This study revealed a specific problem related to the small size of the farms resulting from the successive division of fields. The irrigation duration was very significantly higher in the smallest fields than in the largest fields. However this issue only played a determining role when the farmers were poorly committed, i.e. when the landowners entrusted unskilled workers with irrigation or delegated farm management. Some of the landowners live in other regions or in foreign countries and are described as absentee farmers. Even when they live in the village, they often depend on non-agricultural incomes and cannot be intensively committed. Such impacts of land division on the performance of community-managed irrigation scheme have been observed in studies conducted in similar situations in Spain (Faci et al., 2000; Neira et al., 2005) and in New Mexico (Skaggs & Samani, 2005).

The quality of the irrigation system was also a major cause of variability of irrigation duration.

The improvement of irrigation distribution by means of PVC pipes or good maintenance of traditional earthen *seguías* led to a significant decrease in irrigation duration. But, as for field size, this was particularly true when the farmers were poorly committed. Improvement of the irrigation system can thus be analyzed as a modernization process that reduces the burden of on-farm irrigation management. Maintenance of the irrigation system proved to be important but can only be achieved through expensive ploughing and supplies of sand to rebuild the irrigation system. Whereas PVC pipes are subsidized, sand supplies are not and small-scale farmers with low incomes cannot pay the additional cost. In the case of improved irrigation systems, the gap in irrigation duration between poorly and highly committed farmers was insignificant. Absentee farmers are often described as poorly committed farmers, but some are prosperous and have improved their irrigation system resulting in excellent performances.

The night irrigation events led to an increase in irrigation duration and were revealed to be a particular issue. But this effect was mainly felt when the field was large, or when the farmers were poorly committed and their irrigation system was damaged. This issue could have two different explanations. In the case of farmers' poor commitment and a damaged irrigation system, the increase in irrigation duration seems to be the expression of uncontrolled night irrigation events especially in small fields. Many farmers are not present during the night irrigation events and only go to check irrigation the following morning. Most of these farmers have several professional activities. In the case of large fields, it could also be an intentional tactic to lengthen irrigation to obtain free hot water during the pumping break, or to irrigate an unofficial extension of the plantation. The impact of night irrigation events should be discussed with the farmers who

need to be made aware of the flexible supply represented by night irrigation (Ghumman et al., 2009).

The efficiency and sustainability of the system was called into question when farmers disregarded the rules imposed by community-managed irrigation. This is all the more surprising because the farmers' practices themselves were responsible for the long irrigation duration and consequently the long irrigation rotation intervals. The farmers were aware of the problem but have not yet found an appropriate solution. On the other hand, the farmers have taken advantage of former public policies that have continuously invested in new facilities for the supply of irrigation water. They still believe that it would be possible to create new deep wells in spite of the huge resulting salinization of the CT aquifer. Limited water and soil resources are in opposition to individual strategies that reflect poor water management. Thus, farmers need to be made aware of the fact that the current overexploitation of the fossil groundwater resource and soil salinization will increase with the expansion of date palm plantation (Marlet et al., 2009).

The situation also raises the question of farmers' support for the Water Users Association and of equity, because only few powerful farmers have extended their plantation and concomitantly obtained increasing water rights. Despite a recent decree that defined the final boundary of the oasis, disparity between the small and large owners persists. In Fatnassa oasis, there is a remarkable discrepancy between the actual effect of the extension of date palm plantation and its real impact on the attitude of the farmers. If the rules are not respected by a number of powerful farmers, other farmers are not encouraged to respect the collective rules of community-managed irrigation. This behaviour is in agreement with that observed by Brewer et al. (1997) and Zardari & Cordery (2009) concerning the relationship between inequity and efficiency. The question now is how to escape from this vicious circle. Although oases are often cited as examples of respecting ancient water rights (e.g. Bédoucha, 1987), collective rules must be updated to achieve efficient community management in Fatnassa oasis. The process should be supported by participatory approaches including the farmers, and appropriate state interventions, including a final definition of the oasis boundary to rebuild confidence.

The question of durability is finally raised. In Fatnassa, some powerful farmers, discouraged by the uncertain water delivery and the inefficiency of the community management of irrigation, have installed individual deep wells. In the Nefzaoua, the expansion of the 'illicit' deep wells is well known since the 70s (Kassah, 1996). The phenomena occasioned not only the continuous depletion of groundwater resources but also the degradation of the groundwater quality

(Zammouri et al., 2007). Around the world, especially in large-scale irrigated schemes in Saudi Arabia, Libya, Bangladesh, China, India, and Pakistan, an increasing resort of groundwater has been observed (Plusquellec, 2002). So, even if the situations contribute to provisional increase of food production and farm incomes, it may worsen water scarcity in the long term. A main challenge is now to find pathways to sustainability of the growing groundwater economy (Kuper et al., 2009).

5.5 Conclusion

L'approche mise en place pour étudier les performances individuelles et collectives de l'irrigation dans l'oasis de Fatnassa nous a permis d'évaluer et de hiérarchiser les causes de la faible fréquence du tour d'eau. Les résultats ont montré que par rapport à un tour d'eau théorique établi lors de la modernisation de l'oasis de 19 à 21 jours (selon la surface officielle de chaque antenne), l'intervalle d'irrigation peut atteindre 45 jours en période de pointe. L'examen des relations de causalité a montré qu'au de-là des dysfonctionnements techniques couramment utilisés pour évaluer la performance de l'irrigation, les *pratiques individuelles* à l'échelle de la parcelle sont les plus déterminantes quant au respect *des règles collectives*. Le non respect de ces règles a été attribué à la mauvaise maîtrise de l'irrigation dans les parcelles de petites tailles, la faible qualité d'entretien du système d'irrigation, la faible implication des propriétaires, mais aussi à des irrigations nocturnes laissées sans surveillance.

L'iniquité entre les agriculteurs a été soulignée comme un facteur aggravant du non respect des règles collectives dans la mesure où les grands agriculteurs continuent à étendre leurs plantations (et donc irriguer plus) et d'autres n'ayant pas les moyens financiers ou la possibilité (barrières physiques) d'agrandir leurs exploitations ne voient pas leur intérêt dans le respect des règles de gestion, le tour d'eau resterait toujours perturbé par l'augmentation des surfaces irriguées. D'autant plus que l'extension continue des plantations du palmier dattier remet en question la durabilité du système oasien du fait de l'exploitation de ressources en eau fossiles et des ressources en sol sensibles à la salinisation.

L'effet du manque d'eau suite à la faible fréquence des irrigations estivales comme hivernales ainsi que l'effet d'autres contraintes biotiques et abiotiques sur la performance du palmier dattier sont évalués dans le chapitre ci-après (cf. chap. 6).

Chapitre 6 : Contraintes abiotiques, conduites des palmeraies et leur influence sur les performances du palmier dattier

« Le dattier, en effet, est l'élément essentiel de "l'oasis", micro-milieu privilégié de végétation, perdu dans des immensités désertiques, et le bruissement de ses palmes évoque la douceur des contes orientaux. La réalité est moins poétique ».
Le palmier dattier
P. Munier (1973)

Dans ce chapitre, nous proposons une démarche agronomique d'évaluation de la performance des palmeraies de l'oasis de Fatnassa sous des contraintes de déficit hydrique, de salinité des sols et d'engorgement. Ces contraintes sont en interaction permanente et influencées par les pratiques agricoles et les stratégies paysannes. Ce chapitre fait l'objet de deux publications en préparation. L'une sera orientée vers la confrontation de la perception et des pratiques des agriculteurs à une démarche d'évaluation quantitative des performances des palmeraies sous contrainte environnementale de salinité et d'engorgement, et la deuxième plus agronomique et portera sur la caractérisation de l'état du milieu et son influence sur la performance des palmeraies.

6.1 Introduction

Les enjeux actuels de l'agriculture irriguée sont d'améliorer les performances des systèmes irrigués et de préserver la qualité des ressources en eau et en sol utilisées. Dans ces milieux fortement anthropisés, l'évaluation des performances agronomiques et l'identification des facteurs qui déterminent leur variabilité, sous-entendent plusieurs questions qui restent des sujets de recherche d'actualité. Les démarches scientifiques traitant ce sujet à l'échelle de la parcelle cultivée se résument en trois courants. À l'origine du concept d'itinéraire technique (Sebillotte, 1978), le premier courant étudie l'effet des pratiques et des techniques mises en œuvre par l'agriculteur sur le milieu physique. Souvent, les déterminants des pratiques agricoles, sont analysés à l'échelle de l'exploitation agricole considérée comme le centre de décision de l'agriculteur (Milleville, 1987 ; Sebillotte & Soler, 1989). Le deuxième courant étudie la réponse des cultures irriguées en termes de mécanismes physiologiques, biomasse produite, rendement sous contraintes abiotiques (e.g. Casanova et al., 1999 ; Maas & Hoffman, 1976 ; Ayers & Westcot, 1985 ; Datta et al., 2002 ; Maggio et al., 2005 ; Shani et al., 2007). Le troisième courant peut être défini par une démarche de diagnostic et de suivi à l'échelle de la parcelle agricole qui

est considérée comme un système complexe (Meynard & David, 1992 ; Meynard, 2005). Dans cette démarche les performances agronomiques ont été considérées comme dépendantes de la combinaison des contraintes du milieu et des pratiques paysannes.

Le palmier dattier constitue le pivot stratégique de l'activité oasienne dans le sud de la Tunisie où il joue un rôle primordial tant sur le plan socio-économique que sur le plan écologique. Pour promouvoir ce secteur, l'Etat a investi depuis les années 70 dans plusieurs programmes de développement visant l'augmentation de l'offre en eau, et récemment dans l'amélioration de l'efficacité des systèmes irrigués en matières d'irrigation et de drainage dans le cadre de la double politique d'économie d'eau et de valorisation des ressources en eau et en sol utilisées. Malgré ces efforts d'amélioration, la productivité des ressources utilisées reste très inférieure au potentiel, en particulier dans les périmètres irrigués collectifs, et la pression sur le système de production oasien est forte. Outre les limitations climatiques, plusieurs contraintes d'ordres biophysiques et socioéconomiques impactent les performances de ce secteur. Toutefois, les contraintes et l'étendue de leur impact restent relativement mal caractérisées.

Les études menées sur les performances du palmier dattier, n'ont pas abordé ces systèmes sous un angle holistique et ont été souvent l'œuvre de spécialistes qui ont traité des thématiques spécifiques comme : l'effet de la salinité comme un facteur déterminant la production du palmier dattier (Al-ajmi et al., 2002 ; Shani et al., 2005 ; Tripler et al., 2007), ou la quantification de l'évapotranspiration du palmier en lien avec l'efficacité d'application de l'eau (Siebert et al., 2007), ou avec la biomasse produite (Sellami & Sifaoui, 2008), ou encore l'effet de la pratique du ciselage sur la quantité et la qualité nutritionnelle des dattes produites (Al-Saikhani, 2008). Plus spécifiquement, et pour l'étude de l'effet de l'alimentation hydrique et de la salinité sur les performances des cultures irriguées dans un milieu contrôlé, Shani et al. (2005 et 2007) ont mis en évidence l'influence de la salinité comme un facteur dominant. Ainsi, l'ensemble de ces précédents travaux n'a utilisé qu'une description partielle de la réalité des relations de causalité au sein d'un système irrigué complexe. Pour expliquer la variabilité des performances, ces travaux risquent de donner un rôle considérable à un facteur, ou d'occulter l'effet d'un autre non pris en compte dans l'analyse. Or, en milieu réel, plusieurs facteurs déterminent la performance des cultures, et les relations sont beaucoup plus complexes. C'est le cas lorsque la conduite de l'irrigation, la salinité du sol, la présence d'une nappe superficielle salée interagissent fortement entre-elles mais aussi avec certaines pratiques et stratégies paysannes en occasionnant la dégradation des performances des cultures irriguées (Ghazouani et al., 2009). De plus, l'interaction des différents facteurs amplifierait l'effet attendu d'une seule contrainte (Kijne,

2003) et suppose ainsi des effets additifs des différents facteurs limitants. Ainsi pour les mêmes seuils des contraintes, les rendements observés en milieu réel restent généralement inférieurs à ceux obtenus dans des milieux contrôlés (voir Warrick, 1989 et Howell et al., 1990 cités par Kijne, 2003 ; Kijne, 1998).

Cette analyse bibliographique montre que les difficultés méthodologiques pour évaluer les performances des cultures irriguées sous l'effet de plusieurs contraintes en interaction n'ont pas été surmontées. Ainsi, pour l'amélioration de la productivité des ressources utilisées, il paraît nécessaire dans un premier lieu de comprendre l'état du milieu physique en interaction avec les pratiques et stratégies paysannes et ensuite d'évaluer l'effet de cet ensemble en interaction sur les performances des cultures irriguées et ce dans les conditions de parcelles paysannes. L'objectif principal de ce chapitre s'inscrit dans ce cadre d'analyse. Il s'agit de proposer une approche agronomique d'évaluation de la performance du palmier dattier dans un milieu réel caractérisé par une forte interaction des facteurs du milieu (irrigation, salinité et engorgement) mais aussi par la diversité des pratiques (amendements) et des stratégies paysannes (conduite de la palmeraie).

Les facteurs susceptibles d'influencer les performances du palmier dattier sont nombreux, et nous n'établirons pas donc une liste exhaustive. Basés sur un certain nombre d'hypothèses sur les relations de causalité issues de la phase d'analyse-diagnostic, il nous semble important d'orienter notre démarche vers : (i) la caractérisation du milieu à travers les relations de dépendance des facteurs qui décrivent son état, (ii) la mise en évidence de l'importance de certaines pratiques et des stratégies des agriculteurs, et (iii) et l'étude de l'influence de cet ensemble en interaction sur les performances du palmier dattier. Dans ce chapitre, nous avons choisi deux analyses complémentaires, l'analyse de variance et l'approche de courbes enveloppes, pour étudier l'effet des contraintes abiotiques et de certaines pratiques sur les performances du palmier dattier. Dans un premier paragraphe nous décrivons ces approches ainsi que les indicateurs utilisés dans cette analyse. Dans le second paragraphe nous présentons les résultats de ces analyses. Dans le troisième paragraphe nous proposons une discussion de l'approche méthodologique et des causes effectives de la faible performance des palmiers dattiers pour en proposer des recommandations pour l'amélioration de la performance des palmeraies.

6.2 Matériel et méthodes

6.2.1 Choix des indicateurs d'évaluation

En se basant sur la confrontation de la perception des agriculteurs et le diagnostic des ingénieurs, nous avons identifié les principaux déterminants des performances du palmier dattier (cf. Chap. 4 § 4.2). Les principaux facteurs sont supposés être en relation avec l'état hydrique, l'état du sol et de la nappe phréatique en interaction. Cet ensemble en interaction pourrait être influencé par certaines pratiques et stratégies des agriculteurs. Une batterie d'indicateurs a été mise en place pour étudier ces relations de causalité. Ces indicateurs dérivent des variables décrites dans le chapitre 4 (§ 4.5). Les données correspondantes à l'année agricole 2006-07 proviennent d'enquêtes, d'observations et de mesures de terrain. Les caractéristiques de la nappe ont été renseignées en hiver 2008.

Au sein de l'oasis, nous avons réactualisé le parcellaire et distingué les parcelles irriguées de celles non irriguées sur une durée supérieure à une année. Ces parcelles, considérées abandonnées et non productives, couvrent une surface de 14.36 ha soit 10.45% de la surface actuelle de l'oasis. Elles n'ont pas été considérées dans l'analyse des performances du palmier dattier, par contre pour l'analyse de l'état du milieu physique elles présentent un intérêt pour éclairer certains processus.

Les indicateurs utilisés sont décrits ci-dessous.

6.2.2 Les indicateurs agronomiques

Pour un échantillon de 337 parcelles irriguées couvrant une superficie de 87.4% de la surface actuellement irriguée, des indicateurs de performance du palmier dattier sont élaborés :

(1) Le type de palmeraie et la variété plantée sont renseignés sur la base d'observations de terrain. Le type des palmeraies est une appréciation visuelle basée sur la vigueur du palmier dattier, la qualité d'entretien de la parcelle et du palmier dattier et sur la présence conjointe de la strate moyenne des arbres fruitiers (cf. Chap. 4 § 4.3.3).

(2) Les rendements : il s'agit du rendement total estimé de toutes les variétés confondues (Tonnes.ha⁻¹), le rendement estimé par pied en distinguant les différentes variétés (kg.pied⁻¹) et le rendement de dattes Deglet Nour branchées (kg.pied⁻¹) (catégorie de dattes destinée à l'export).

L'estimation a été effectuée par un acheteur sur pieds en fin septembre-octobre 2007, et la validation a été effectuée, pour quelques parcelles (n = 42), par la confrontation de la production estimée avec celle récoltée et triée sur la parcelle en octobre-novembre 2007.

Pour les pieds Deglet Nour, nous avons qualifié le rendement total (dattes branchées, dattes en vrac, et déchets) en kg.pied⁻¹ par 'quantité', et un autre indicateur de 'qualité' a été défini comme la proportion de dattes branchées par rapport au rendement total.

Les rendements observés à l'échelle des palmeraies sont caractérisés par une grande variabilité. Pour l'échantillon de 337 parcelles irriguées étudiées, le rendement varie de 0 à 22 t.ha⁻¹ avec une moyenne de 4.3±3.9 tonnes.ha⁻¹. Le rendement moyen des pieds de variétés communes est de 43.9±29.9 kg.pied⁻¹ avec un maximum 120 kg.pied⁻¹. Quant à la variété Deglet Nour, le rendement moyen est de 32.8±22.1 avec un maximum de 100 kg.pied⁻¹. Les rendements des dattes branchées sont également variables, avec un maximum observé de 90 kg.pied⁻¹, un minimum de 0 kg.pied⁻¹, autour d'une moyenne de 14.4±14.6 avec une médiane 10.5 kg.pied⁻¹.

(3) La densité de plantation : elle est inversement proportionnelle à la surface de la parcelle (Fig. 6.1). Les plus fortes densités sont observées au niveau des petites parcelles (0.01-0.1 ha) avec une médiane de 303 pieds.ha⁻¹ comparées aux parcelles plus grandes avec des médianes de 246, 228, 210 et 181 pieds.ha⁻¹ pour respectivement 0.1-0.25, 0.25-0.5, 0.5-1 et 1-2.65 ha.

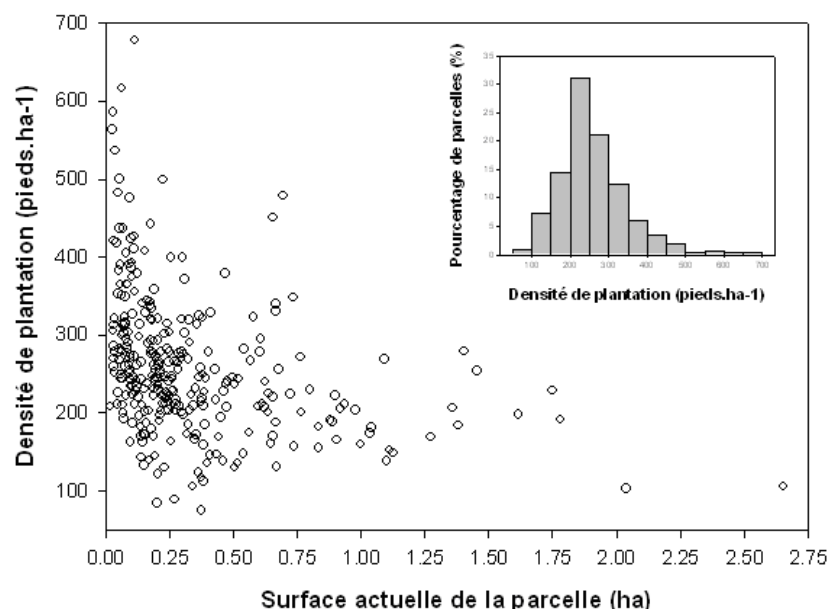


Figure 6.1 : Densité de plantation vs. surface de parcelle.

6.2.3 Les indicateurs de l'état du milieu physique

(1) Etat hydrique : nous avons choisi trois indicateurs pour caractériser l'état hydrique du milieu en relation avec la conduite d'irrigation pour l'année agricole 2006-07 et pour la totalité des parcelles irriguées (n=419). Il s'agit de la durée d'irrigation annuelle, la fréquence des irrigations hivernales et la fréquence des irrigations estivales (cf. Chap. 5 § 5.3.3)

A l'échelle de l'oasis, la durée d'irrigation annuelle varie de 10 à 423 h.ha⁻¹.an⁻¹ pour une moyenne de 126.4±64.5 et une médiane de 119.3 h.ha⁻¹.an⁻¹. La fréquence des irrigations montre des comportements saisonniers différents. En effet 41.2% des parcelles sont rarement irriguées en hiver (0 à 2 fois) alors que la majorité des parcelles sont irriguées en été dès que le tour d'eau le permet, soit 21.7% de parcelles qui ne sont irriguées que 1 à 3 fois en saison estivale.

(2) La salinité du sol : elle a été mesurée en novembre et octobre 2007 sur le terrain par un conductivimètre électromagnétique (EM-38). Pour limiter les hétérogénéités des conditions de terrain liées à l'irrigation, nous avons choisi la date de mesure correspondant à la période de la récolte où les agriculteurs arrêtent l'irrigation. Les mesures ont concerné un échantillon de 416 parcelles dont 48 non irriguées en 2006-07. Le signal de l'EM-38 a été calé en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée, la salinité et la profondeur de la nappe (c.f Chap. 4 § 4.5.2).

Dans l'oasis de Fatnassa, la conductivité électrique de la couche de sol comprise entre 0 et 100 cm varie de 2.85 à 53.97 dS.m⁻¹ avec une moyenne 13.7±8.1 dS.m⁻¹ et une médiane 12 dS.m⁻¹.

(3) La fréquence des amendements sableux : les amendements sableux sont généralement associés à un grand labour et des amendements organiques. Cet indicateur a été renseigné pour l'ensemble des parcelles de l'oasis sur la base d'enquêtes et d'observations de terrain.

Dans 6% des parcelles irriguées de l'oasis de Fatnassa, les amendements sableux sont fréquents (≤3 ans) avec un apport important occasionnant une surélévation relative de la parcelle en question par rapport aux parcelles avoisinantes. Par contre, 8% des parcelles n'ont reçu aucun amendement depuis plus de 10 ans. Pour le reste des parcelles (86%), la fréquence des amendements varie de 3 à 7 années.

(4) La profondeur et la salinité de la nappe en saison hivernale ont été renseignées pour la totalité des parcelles de l'oasis de Fatnassa en saison hivernale où la contrainte d'engorgement engendrée par la position superficielle de la nappe est plus prononcée. Les caractéristiques de la

nappe sont issues de l'interpolation par krigeage à partir de 165 points de mesures de terrain en février 2008 (cf. Chap. 4 § 4.5)

La profondeur de la nappe varie de 0.55 à 1.31 m autour d'une moyenne de 0.81 ± 0.19 et une médiane de 0.77 m. La position superficielle de la nappe (0.55-0.75 m) est dominante avec 45.1% des parcelles contre 4.41% des parcelles correspondent à une position relativement profonde de la nappe (1.25-1.31 m). L'examen de la distribution spatiale de la profondeur de la nappe (cf. Chap. 4 § Fig. 4.5) montre une structure spatiale de l'indicateur d'engorgement. La nappe est profonde dans les zones amont de l'oasis (profondeur > 1 m). Elle est très superficielle (profondeur < 0.6 m) principalement au niveau de deux zones qui marquent un changement du cheminement des collecteurs principaux de drainage. De plus la nappe est superficielle (profondeur < 0.8 m) vers l'aval de l'oasis. Quant à la salinité de la nappe, elle varie de 6.6 à 17.3 dS.m⁻¹ avec une moyenne 11.3 ± 2.5 et une médiane de 10.8 dS.m⁻¹. La distribution spatiale (cf. Chap. Fig. 4.6) de la conductivité électrique de la nappe montre elle aussi une structure spatiale récurrente de sa profondeur avec une redistribution amont/aval des sels, ainsi les salinités les plus élevées sont observées vers l'aval de l'oasis.

6.2.4 Méthodes

6.2.4.1 Caractérisation des palmeraies

La distribution spatiale des différents types de palmeraies est tout d'abord caractérisée en se basant sur des observations de terrain. Ensuite, la variabilité de production des palmeraies est caractérisée en fonction de la relation (type de plantation x variété de palmier plantée) selon une ANOVA deux facteurs. Le test de Fisher est utilisé dans l'étude de source de variance, et les moyennes sont comparées deux à deux selon la méthode des moindres carrés au seuil $p_v < 0.05$.

6.2.4.2 Interaction des facteurs du milieu : analyse de variance et comparaison des médianes

Une étape préalable à l'analyse de la variance de la performance des palmeraies consiste à caractériser les déterminants de l'état du milieu physique : état hydrique en relation avec l'irrigation, le sol en relation avec la salinité et les amendements sableux et la profondeur et la salinité de la nappe phréatique et leur distribution spatiale. Il s'agit ensuite de mettre en évidence les relations entre ces déterminants conformément aux hypothèses de dépendance et aux relations de causalité (cf. Chap. 4 § 4.2). Vu la grande variabilité des indicateurs étudiés et la non-normalité de leur distribution, la méthode retenue pour vérifier les interactions des facteurs limitants est Kruskal-Wallis ANOVA 1 facteur. Les médianes des groupes du facteur dépendant

sont comparées deux à deux suivant le test de Dunn. Les facteurs dépendants quantitatifs sont préalablement transformés en classes. Les classes ont été agrégées quand les différences observées entre les médianes ne sont pas significatives.

6.2.4.3 Méthodes d'évaluation des effets des facteurs limitants des performances des pieds Deglet Nour

Plusieurs analyse statistiques 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) ont été utilisées pour étudier l'influence des différents facteurs déterminants les performances des cultures irriguées. Dans notre cas, et vu les hypothèses sur l'interaction des facteurs du milieu, nous avons procédé à deux analyses statistiques complémentaires, les ANOVA et les courbes enveloppes, pour étudier les sources de la dégradation des performances du palmier dattier dans l'oasis de Fatnassa. Ci-dessous, nous présentons les étapes suivies pour l'analyse quantitative et une tentative de fixer un modèle pour expliquer la variabilité des performances des pieds Deglet Nour.

a. Analyse de la variance

Pour identifier pas à pas les facteurs limitants effectifs des performances des pieds Deglet Nour, nous avons considéré deux étapes successives d'analyse de variance. Il s'agit ainsi de :

- (i) tester l'effet de chaque facteur, pris individuellement, sur les performances du palmier dattier selon une ANOVA un facteur et des comparaisons de médianes. Des agrégations des groupes considérés ont été effectuées quand les différences observées des médianes ne sont pas significatives ; et
- (ii) tester l'effet des facteurs significatifs retenus pris deux à deux -selon les hypothèses de dépendance- selon un modèle général linéaire (MGL) et des comparaisons de moyennes. Il s'agit ainsi d'inclure l'effet de chaque variable et l'effet de leur interaction sur les performances du palmier dattier. Cette étape permet d'orienter la tentative de fixer un modèle explicatif des facteurs limitants de la performance des palmeraies.

Ces analyses vont nous permettre de caractériser la *réponse moyenne* du palmier dattier à un ou deux facteurs limitants en considérant l'effet d'autres facteurs.

b. Courbe enveloppe

Pour étudier la *réponse potentielle* du palmier dattier aux facteurs limitants retenus nous avons choisi la méthode de courbes enveloppes. Cette méthode graphique permet la mise en évidence de l'effet du facteur limitant sur la variable expliquée bien que les deux variables explicatives et

expliquées ne soient pas linéairement reliées. Elle permet aussi d'étudier les relations de causalité tout en intégrant l'influence d'autres contraintes. Cette approche est particulièrement appropriée si l'on s'intéresse aux effets de plus qu'un seul facteur limitant (Lark, 1997). Elle a été appliquée pour décrire l'effet de la salinité (e.g., Johnson et al., 2003 ; Kitchen et al., 2003) ou une combinaison de facteurs édaphiques et les propriétés d'eau d'irrigation et de la nappe (Casanova et al., 1999) sur les rendements des cultures.

Dans notre démarche, nous nous sommes inspirés des travaux d'Evanylo & Sumner (1987) ; Casanova et al. (1999) et Shani et al. (2007). Cette approche suppose que la limite supérieure de la relation entre une variable dépendante (e.g. le rendement d'une culture) et une variable indépendante (e.g. la salinité du sol) caractérise le 'pure-effet'. Sur la zone qui entoure cette limite, la variable indépendante étudiée est supposée être le principal facteur limitant et les autres variables sont supposées être à leurs optimums ; et pour les individus situés sous la zone du pure-effet, la variable dépendante est alors limitée par un ou plusieurs autres facteurs limitants (Webb, 1972 ; Alva & Bille, 1981 ; Lewandowski & Schmidt, 2006 ; Milne et al., 2006), c'est la zone 'd'interaction-effet'. Si on note le rendement par Y -variable dépendante- et la variable explicative du rendement par X , la méthode repose sur le principe défini par $Y=f(X)$ comme une fonction satisfaisant $p[Y < f(X)] = \alpha$ pour toutes les valeurs de X tel que $f(X)$ représente le $\alpha^{\text{ème}}$ quantile de la variable Y (Makowszki et al., 2007). Chaque variable indépendante a été subdivisée en intervalles -souvent équidistants et dont les limites sont tirées de l'étape précédente-. Puis, la valeur maximale du rendement de chaque classe est calculée pour une probabilité de dépassement de 5% afin de s'affranchir d'éventuelles erreurs d'estimation, mais aussi de l'effet de proximité des parcelles. Les valeurs de rendements maximums sont notées Y_i . Les médianes du facteur dépendant par intervalle sont calculées, notées X_i . La courbe passant par les médianes X_i et les valeurs maximums Y_i est finalement tracée.

La méthode retenue consiste ainsi à (i) analyser la réponse du potentiel de production à un (ou deux) facteur(s) limitant(s) dans un milieu réel, et (ii) définir des seuils de sensibilité du palmier dattier.

Tous les tests statistiques sont considérés significatifs au seuil alpha de 5%. Les seuils suivants sont utilisés : * est significatif au seuil 5%, ** est significatif au seuil 1%, *** est significatif au seuil 0.1%, NS est non significatif au seuil 5%. Les analyses statistiques sont développées sous SigmaStat (3.5) associé à SigmaPlot (10.0).

6.3 Résultats

6.3.1 Caractérisation des palmeraies

6.3.1.1 Distribution spatiale des palmeraies

Nous avons distingué six types de palmeraies (cf. Chap. 4 § 4.5.3). Sur la figure 6.2, nous montrons la distribution spatiale de ces types de plantation. L'observation de cette figure montre :

- une concentration des palmeraies traditionnelles à l'amont de l'oasis, à proximité du village ;
- les palmeraies modernes sont concentrées sur la moitié nord ;
- les palmeraies jeunes sont situées sur la périphérie et concentrées sur l'antenne 3. Ces extensions sont moins visibles sur l'antenne 2 vue que la majorité des parcelles sont distribuées en sens de la longueur et où le partage des terres a été souvent orienté pour garantir un accès libre de tous les héritiers ou associés à la terre nue. Au sein d'une même parcelle nous observons ainsi un mélange de plantations anciennes (datant des années 20) jusqu'à des très jeunes plantations (âgées d'une année). L'extension est encore moins visible sur l'antenne 1 vue qu'il n'y a pas de possibilité de création de nouvelles plantations (présence de barrière physiques, le village et les dunes de sables) ;
- les palmeraies à conduite de survie sont surtout observées au centre, le cœur de l'aménagement, (antenne 1), et au milieu et à l'aval de l'antenne 2 ; et
- les palmeraies non traditionnelles moyennement productives sont particulièrement concentrées sur l'antenne 2 et le centre de l'antenne 3. Les parcelles abandonnées sont plus concentrées au cœur de l'aménagement. Elles sont aussi visibles en aval de l'antenne 3 où elles sont plutôt en relation avec des difficultés de transmission de l'héritage.

6.3.1.2 Le rendement au sein des palmeraies

Le rendement du palmier dattier dans l'oasis varie en fonction du type de la palmeraie, de la variété, et de l'interaction (type de plantation x variété). Les résultats des comparaisons des moyennes pour les deux caractéristiques étudiées sont présentés dans la figure 6.3.

Les rendements les plus élevés sont observés au sein des palmeraies modernes (14.2% de l'échantillon) avec une moyenne de 9.4 t.ha^{-1} . Quant aux rendements les plus faibles, ils sont observés au niveau des plantations jeunes (14.5% de l'échantillon) avec une moyenne de 1.9 t.ha^{-1} . Les rendements observés sur les plantations à conduite de survie (27.3% de l'échantillon) sont également faibles (une moyenne de 2.5 t.ha^{-1}). Alors que les moyennes de rendement des plantations traditionnelles et non traditionnelles, elles sont de 6.4 t.ha^{-1} et 4.8 t.ha^{-1} ,

respectivement. Les différences entre les moyennes de rendement observées dans les cinq types de plantations sont significatives au seuil 5% à l'exception des deux types de plantations moyennement productives (traditionnelles et non traditionnelles), et les plantations à conduite de survie avec celles jeunes. Ainsi, nous pouvons distinguer trois conduites caractérisant les palmeraies de Fatnassa : la 'conduite intensive' regroupant les palmeraies modernes et celles moyennement productives (traditionnelles et non traditionnelles) ; la conduite de survie ; et la conduite d'extension des plantations jeunes.

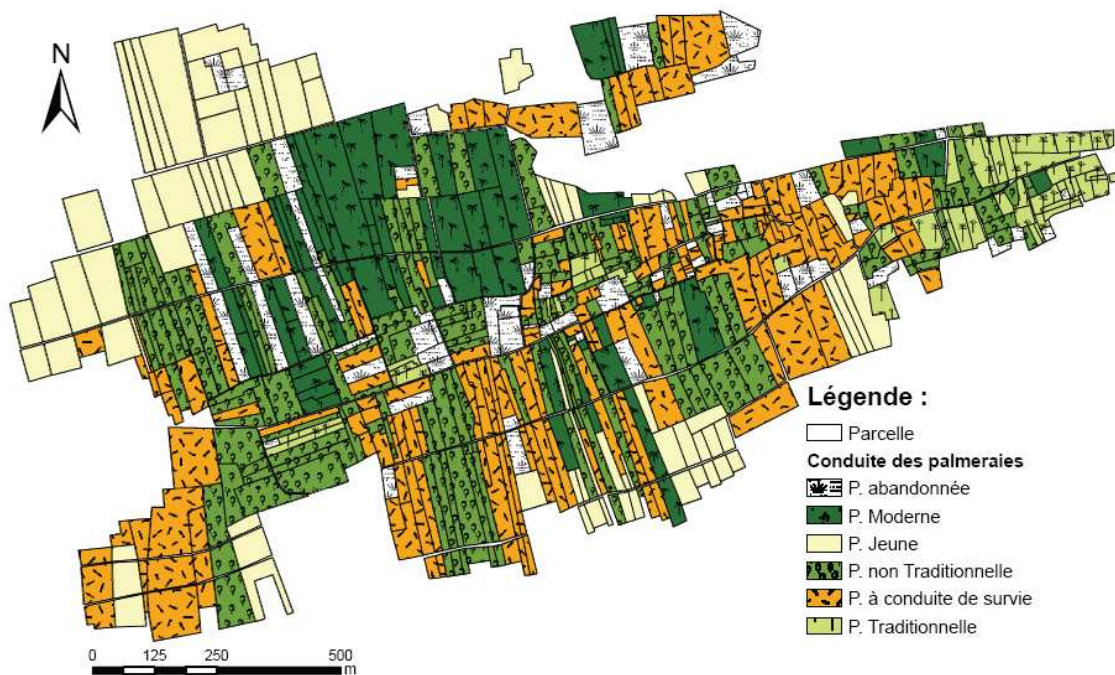


Figure 6.2 : Distribution spatiale des différents types de palmeraies (n=499 parcelles, 2006-07).

Le rendement est aussi variable en fonction de la variété du palmier dattier plantée. Cette influence variétale est significative surtout au sein des plantations modernes et des plantations traditionnelles. Les variétés communes (VC), essentiellement la variété 'Allig', sont plus productives comparées à la variété Deglet Nour (DN). La présence conjointe des dattiers de variétés communes et Deglet Nour a un effet hautement significatif sur le rendement qui décroît de 5.7 t.ha⁻¹ en cas de mélange de variétés à 4.2 t.ha⁻¹ dans les plantations de monoculture Deglet Nour.

Malgré la grande production des pieds de variétés communes, l'oasis de Fatnassa est caractérisée par la monoculture Deglet Nour, où seulement 20.7% des parcelles étudiées ou encore 19.6% de la surface de l'échantillon présentent un mélange variétal. Ainsi, pour des raisons statistiques

d'homogénéité et de taille de l'échantillon mais aussi suite à la sensibilité de la variété Deglet Nour aux contraintes environnementales et sa valeur économique importante, seulement la variété Deglet Nour a été considérée dans les analyses statistiques ultérieures pour comprendre la variabilité des performances des pieds de palmier dattier.

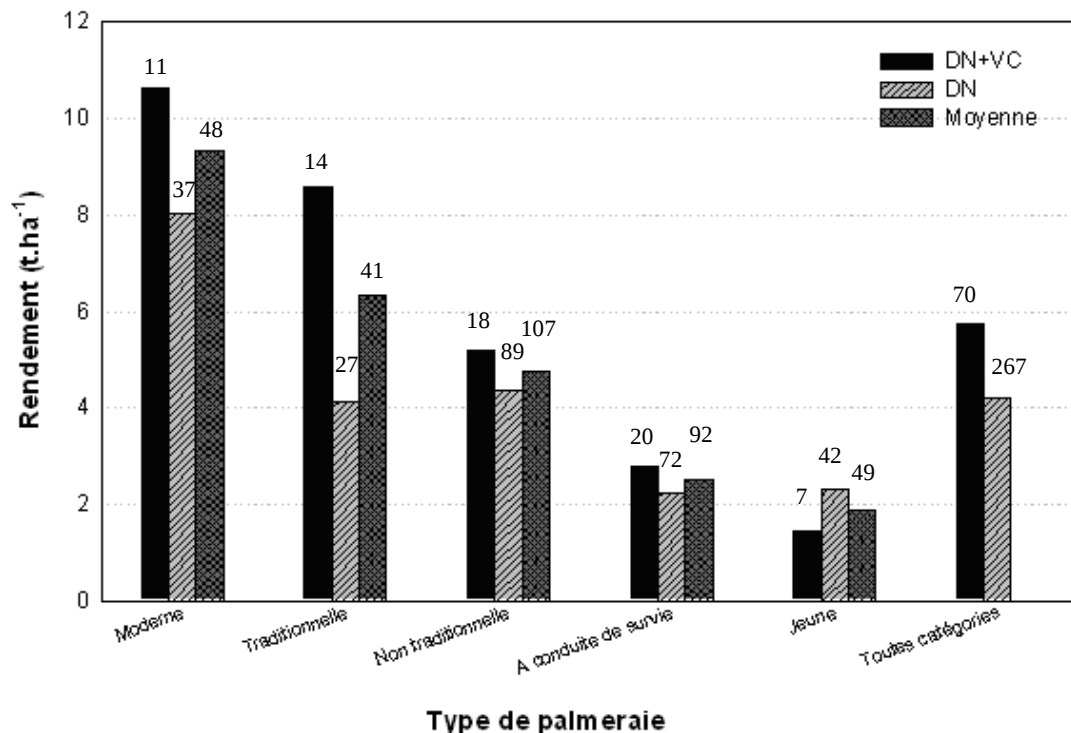


Figure 6.3 : Performance des plantations de palmier dattier et influence variétale (n=337, 2006-07).

6.3.1.3 Quantité de dattes vs. qualité des dattes

La proportion de dattes branchées par rapport au rendement total montre une forte variabilité allant de 0 à 92% (Fig. 6.4). Les deux indicateurs des performances du palmier dattier en quantité et en qualité, sont indépendants. Ainsi, tous les cas de figures cohabitent entre des palmeraies qui produisent une faible quantité avec une forte proportion de dattes branchées et des palmeraies qui atteignent le potentiel quantitatif absolu mais les dattes en vrac et les déchets prédominent les dattes branchées.

6.3.2 *Caractérisation des interactions des contraintes abiotiques*

L'analyse statistique des interactions des facteurs du milieu et les pratiques des agriculteurs a montré des dépendances significatives entre les indicateurs considérés dans la caractérisation de l'état du milieu.

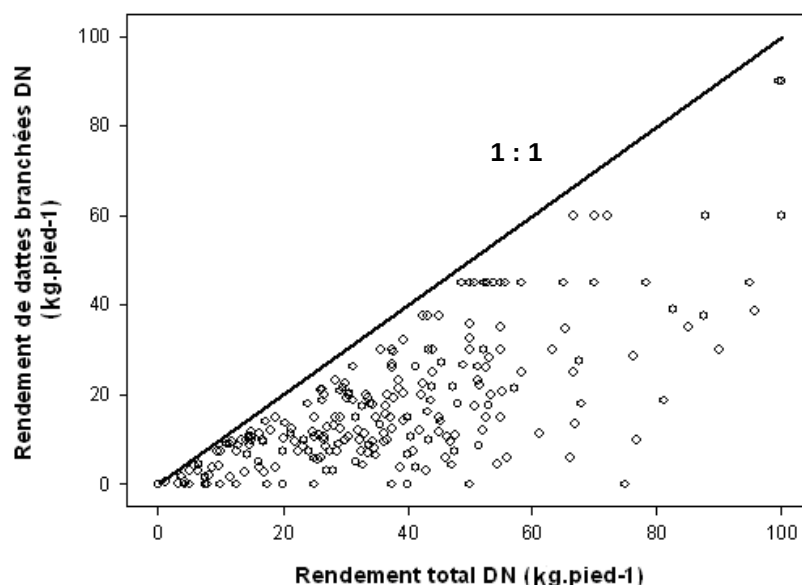


Figure 6.4 : Variabilité de la quantité et de la qualité des dattes DN produites (n=337, 2006-07).

6.3.2.1 Les variables qui déterminent la salinité du sol

La salinité du sol est influencée par la fréquence des amendements sableux, la conduite de l'irrigation (durée et fréquence), et la salinité et la profondeur de la nappe.

(1) La salinité du sol a tendance à diminuer avec l'augmentation de la fréquence et la quantité de sable apporté. Nous avons observé que les parcelles fréquemment amendées avec des quantités importantes de sable ont la plus faible salinité du sol (8.5 dS.m^{-1}). Des valeurs de salinité du sol de l'ordre de 17 dS.m^{-1} ont été observées dans les parcelles n'ayant reçues aucun amendement sableux depuis plus de 10 ans.

(2) Les parcelles fréquemment irriguées ($\geq 7 \text{ fois.an}^{-1}$), présentent la plus faible salinité soit une médiane de 10 dS.m^{-1} par rapport aux parcelles irriguées de 5 à 6 (13 dS.m^{-1}), ou encore les parcelles rarement irriguées (2 à 4 fois) avec une médiane de 14.5 dS.m^{-1} .

(3) La salinité du sol a aussi tendance à diminuer avec la durée d'irrigation annuelles (Fig 6.5 (a)). Nous observons ainsi que le groupe des parcelles non irriguées ($0 \text{ h.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) présente des conductivités électriques les plus élevées (médiane de 20 dS.m^{-1}). La conductivité électrique décroît significativement avec la durée d'irrigation annuelle et passe de 15 dS.m^{-1} au niveau des parcelles très peu irriguées (10 à 50 $\text{h.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) à 8 dS.m^{-1} au niveau des parcelles les plus irriguées (200 à 423 $\text{h.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$).

(4) Les figures 6.5(b), et 6.5(c) illustrent le comportement de la salinité du sol avec les caractéristiques de la nappe. Nous observons ainsi une tendance à l'augmentation de la salinité du

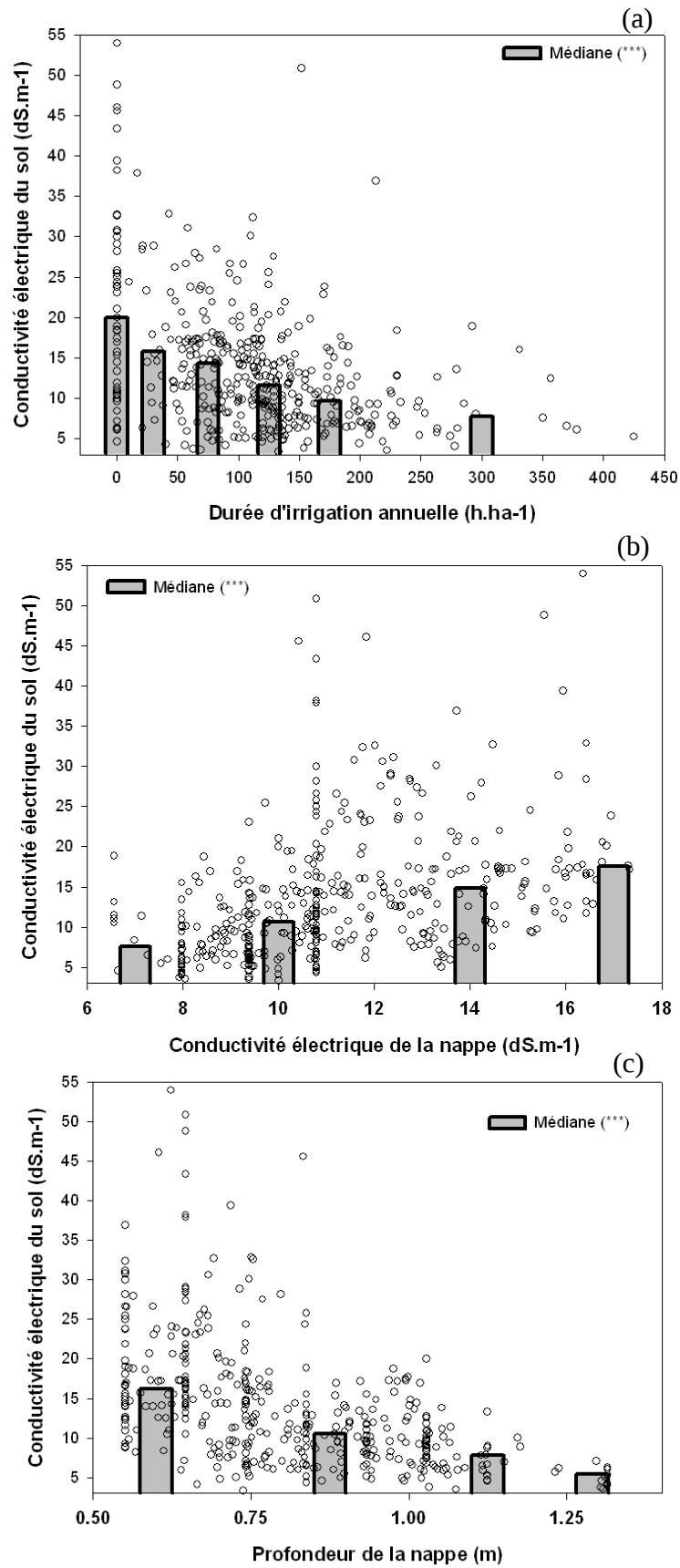


Figure 6.5 : Influence de la durée d'irrigation annuelle (a), de la salinité de la nappe (b), de la profondeur de la nappe (c) sur la salinité du sol ; n=416.

sol avec l'augmentation de la conductivité électrique de la nappe et avec la diminution de sa profondeur. Une nappe moins salée ($CE < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) favorise une conductivité électrique (CE_e) faible 8 dS.m^{-1} contre 17.5 dS.m^{-1} quand la nappe est plus salée ($CE \geq 16 \text{ dS.m}^{-1}$). Nous observons aussi une $CE_e \leq 8 \text{ dS.m}^{-1}$ pour une profondeur plus de 1 m contre une CE_e de l'ordre de 16 dS.m^{-1} pour une nappe plus superficielle ($\leq 0.75 \text{ m}$).

6.3.2.2 Déterminants de la salinité de la nappe

L'analyse de la variabilité de la salinité de la nappe montre des effets hautement significatifs de sa position et de la durée d'irrigation annuelle, par contre l'effet de la fréquence des irrigations hivernales n'est pas significatif.

L'ANOVA de l'effet de la profondeur de la nappe (Fig. 6.6(a)) montre trois groupes de parcelles significativement différents : (i) un groupe de parcelles où la nappe est superficielle ($< 0.75 \text{ m}$) avec une conductivité électrique de la nappe qui est la plus élevée soit une médiane de 12 dS.m^{-1} , (ii) l'ensemble des parcelles où la profondeur de la nappe est entre 0.75 et 1 m avec une conductivité électrique médiane de 10.6 dS.m^{-1} , contre (iii) un groupe de parcelles où la nappe est à une profondeur $> 1 \text{ m}$ où la conductivité électrique de la nappe est la plus faible avec une médiane $< 9.5 \text{ dS.m}^{-1}$.

L'étude de l'effet de la durée d'irrigation sur la salinité de la nappe (Fig. 6.6(b)) montre que les parcelles les plus irriguées ($\geq 200 \text{ h.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) ont une conductivité électrique de la nappe nettement inférieure à celles des catégories moins irriguées.

6.3.2.3 Profondeur de la nappe et fréquence des irrigations

Les relations entre la profondeur de la nappe et la fréquence des irrigations hivernales et la fréquence des irrigations estivales ont été étudiées. Dans cette étude nous avons choisi d'occulter les parcelles abandonnées pour ne pas les confondre avec les parcelles non irriguées en hiver mais irriguées en été. La figure 6.7(a) montre que la fréquence des irrigations hivernales n'a pas une influence significative sur la profondeur de la nappe. Toutefois, la fréquence des irrigations estivales et la profondeur de la nappe sont hautement corrélées et nous observons une tendance à l'augmentation de la fréquence des irrigations quand la nappes devient profonde (Fig. 6.7(b)).

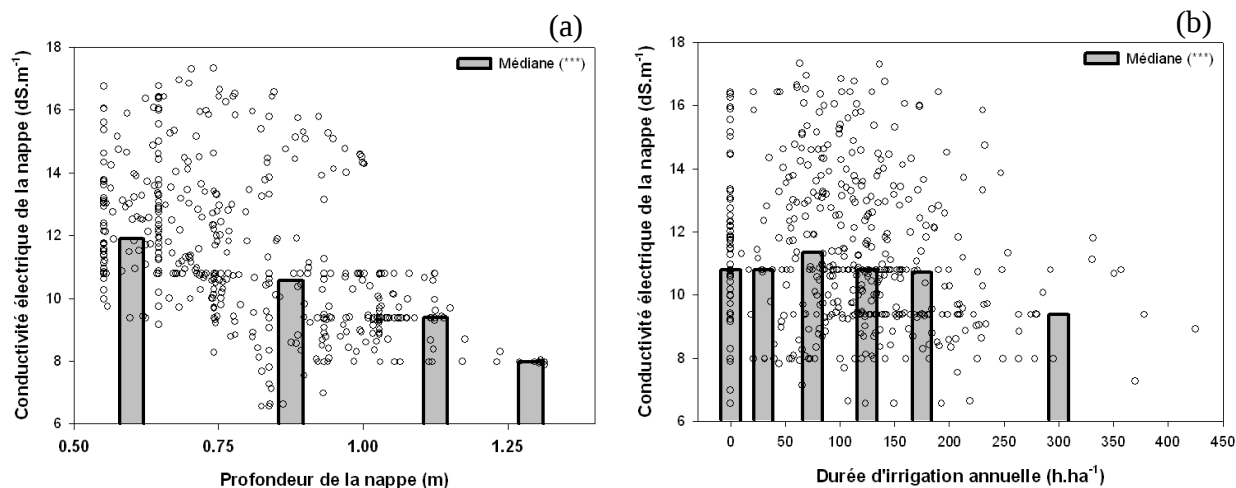


Figure 6.6 : Variabilité de la salinité de la nappe en fonction de la profondeur de la nappe (a) et en fonction de la durée d’irrigation annuelle (b) ; n=499.

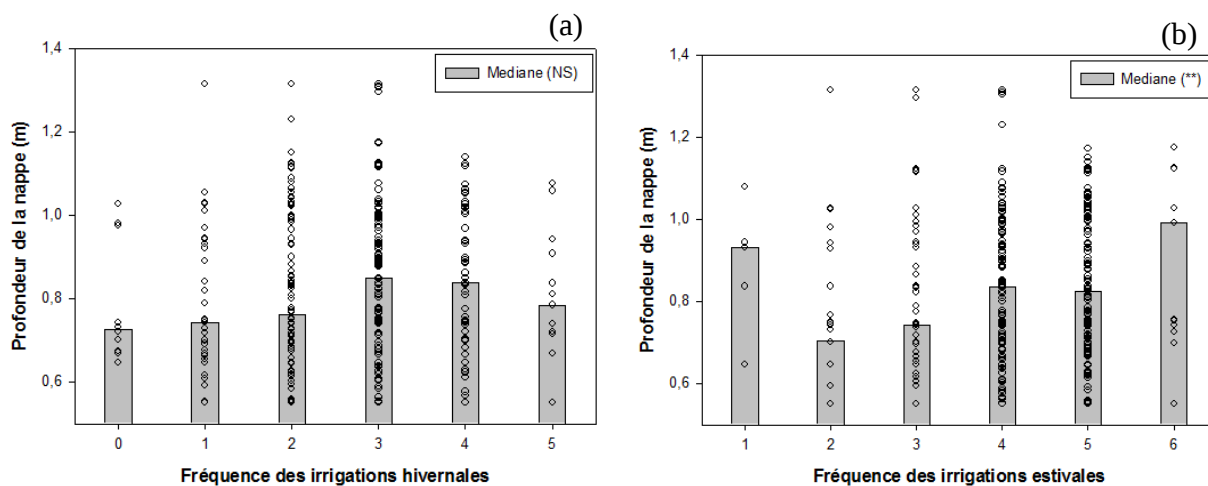


Figure 6.7 : Influence de la fréquence des irrigations hivernales (a), et des irrigations estivales sur la profondeur de la nappe ; n=419.

6.3.3 Influence des facteurs limitants sur les performances qualitatives et quantitatives des pieds Deglet Nour

L’examen des indicateurs quantitatifs et qualitatifs des pieds Deglet Nour montre une faible performance des palmeraies de Fatnassa. En effet, seulement 5% des parcelles étudiées ont un rendement quantitatif très élevés, soit 75 à 100 kg.pied⁻¹ et que 11% des parcelles atteignent une proportion élevée de dattes branchées, soit 75 à 92% du poids total.

6.3.3.1 Facteurs limitants et choix d’analyses

L’analyse de l’effet de chaque facteur sur les performances quantitatives et qualitatives des pieds Deglet Nour montre que (Tab. 6.1) :

- (i) la durée annuelle d'irrigation, la fréquence des irrigations hivernales, la conductivité électrique du sol, la fréquence des amendements, la conduite de palmeraie et la densité de plantation ont des effets hautement significatifs (<0.01) à la fois sur la quantité et sur la qualité des dattes produites ;
- (ii) la profondeur de la nappe a effet significatif au seuil 5% sur la performance quantitative et cet effet devient hautement significatif (<0.001) sur la performance qualitative ; et
- (iii) le nombre des irrigations estivales a un effet hautement significatif (<0.001) sur la qualité des dattes, par contre son effet sur la quantité de dattes produites est non significatif.

Conformément aux hypothèses préétablies, seulement les indicateurs concernant les facteurs à effet significatif ont été considérés dans l'ANOVA deux facteurs. Le Tableau 6.2 montre les résultats des analyses en utilisant le modèle général linéaire (MGL) quand les effets des deux facteurs testés sont significatifs sur la quantité et/ou sur la qualité des dattes. Il est important de noter que les effets des interactions correspondantes ne sont pas significatifs.

L'examen des ANOVA deux facteurs montre que la qualité est plus sensible que la quantité des dattes à la combinaison des facteurs étudiés (Tab. 6.2). En effet, les MGL suivants montrent des effets significatifs de la combinaison des deux facteurs sur la quantité de dattes produites : (durée d'irrigation annuelle x fréquence des irrigations hivernales), (durée d'irrigation annuelle x salinité

L'examen des ANOVA deux facteurs montre que la qualité est plus sensible que la quantité des dattes à la combinaison des facteurs étudiés (Tab. 6.2). En effet, les MGL suivants montrent des effets significatifs de la combinaison des deux facteurs sur la quantité de dattes produites : (durée d'irrigation annuelle x fréquence des irrigations hivernales), (durée d'irrigation annuelle x salinité du sol), et (salinité du sol x fréquence des amendements sableux). En plus de ces quatre précédentes combinaisons, la qualité des dattes est sensible aux effets conjugués des facteurs suivants : (durée d'irrigation annuelle x fréquence des irrigations estivales), (durée d'irrigation annuelle x profondeur de la nappe), et (profondeur de la nappe x fréquence des irrigations hivernales). Quant à l'effet combiné de (conduite de la palmeraie x densité de plantation), il ne s'avère significatif que sur la quantité des dattes produites. Les résultats de tous les modèles et les comparaisons de moyennes sont donnés dans l'annexe (Tab. 2).

Vu la multiplicité des modèles significatifs, simples ou combinés, nous avons orienté notre choix vers la mise en évidence : (1) de la sensibilité des *performances potentielles, quantitatives et/ou qualitatives* des pieds Deglet Nour à chaque facteur où l'effet individuel est significatif avec la

mise en évidence de seuil de sensibilité ; et (2) la sensibilité des performances *moyennes et/ou potentielles* à deux facteurs où le MGL correspondant est significatif.

Tableau 6.1 : Analyse de la variance du rendement total et du rendement de dattes branchées des pieds DN (2006-07, n=337).

Source de variance de la performance des palmiers dattiers DN		n	Quantité Médiane (kg.pied ⁻¹)	Qualité Médiane (%)
Conduite de l'irrigation	Durée d'irrigation annuelle (h.ha⁻¹.an⁻¹)		***	***
	10 – 50	22	16.11 ^a	20.00 ^a
	50 – 100	93	32.5 ^b	33.33 ^{ab}
	100 – 150	128	28.76 ^{ab}	37.50 ^{ab}
	150 – 200	55	40 ^b	49.37 ^b
	200 – 425	39	40 ^b	42.86 ^b
	Nombre des irrigations hivernales		***	***
	0 ou 1 ou 2	135	26.67 ^a	28.57 ^a
	3	123	33.57 ^b	37.50 ^b
	4 ou 5	79	37.79 ^b	45.21 ^b
	Nombre des irrigations estivales		NS	***
	1 ou 2 ou 3	70	34.21	23.08 ^a
Caractéristiques du sol et de la nappe	Conductivité électrique du sol (0-100 cm) (dS.m⁻¹)		***	***
	2 – 6	42	43.71 ^a	37.50 ^a
	6 – 10	99	37.83 ^a	42.86 ^a
	10 – 14	70	35.00 ^a	42.86 ^a
	14 – 18	65	28.33 ^{ab}	27.50 ^b
	18 – 22	17	20.46 ^b	27.27 ^b
	22 – 50	21	8.00 ^c	0.00 ^c
	Fréquence des amendements		***	***
	Amendements importants en quantité	23	44.09 ^a	51.22 ^a
	Fréquence 3 à 5 ans	127	32.69 ^a	42.86 ^a
	Fréquence ≥6 ans	162	28.17 ^b	33.33 ^a
	Pas d'amendements	25	15 ^b	0.00 ^b
	Profondeur de la nappe (m)		*	**
	0.55 – 0.75	136	31.46	33.33
	0.75 – 0.9	72	37.98	50.29
	0.9 – 1.10	99	26.67	37.50
	1.10 – 1.25	19	32.22	34.43
	1.25 – 1.31	11	52.273	47.37
Contraintes agronomiques	Conduite de la palmeraie		***	***
	P. Moderne	48	43.71 ^a	24.74 ^a
	P. Traditionnelle	41	29.17 ^{ab}	11.74 ^b
	P. non Traditionnelle	107	35.00 ^a	11.67 ^b
	P. à conduite de survie	92	27.25 ^b	4.96 ^c
	P. Jeune	49	16.25 ^b	7.50 ^c
	Densité de plantation (pieds.ha⁻¹)		***	**
	75 - 150	26	29.98	45.11
	150 – 200	46	34.21	47.37
	200 – 250	98	35.33	40.18
	250 – 300	66	37.96	42.86
	300 – 400	60	33.16	31.03
	400 – 678	22	24.63	37.50

Les comparaisons des médianes selon le test de Dunn sont significatives au seuil de 5% pour ^{a,b,c}

Tableau 6.2 : Effets conjugués des facteurs limitants des performances du palmier dattier (quantité et qualité des dattes), ANOVA deux facteurs ; n=337.

	Etat hydrique		Le milieu physique			Densité de plantation
	Nb. des irrigations estivales	Nb. des irrigations hivernales	Salinité du sol	Fréquence des amendements	Profondeur de la nappe	
Durée annuelle	- (a)***, (b)*	(1)** , ** (2)** , ***	*** , *** * , ***	- -	- *** , *	
Nb. des irrigations hivernale				- -	- *** , *	
Salinité du sol				*** , * *** , *	- -	
Conduite de palmeraie						*** , * -

^(a) effet de la ligne, ^(b) effet de la colonne ;

(1) effet sur la quantité et (2) effet sur la qualité des dattes

6.3.3.2 Influence de la conduite de l'irrigation

La conduite de l'irrigation peut être définie par une fréquence des irrigations hivernales, une fréquence des irrigations estivales et une durée annuelle. Les effets des indicateurs de la conduite de l'irrigation, pris individuellement, sont hautement significatifs à la fois sur les performances quantitatives et qualitatives des pieds Deglet Nour, excepté l'effet de la fréquence des irrigations estivales sur la performance quantitative (Tab. 6.1).

(1) L'effet de la conduite de l'irrigation sur les potentiels quantitatifs et qualitatifs est analysé ci-dessous :

(i) La fréquence des irrigations hivernales influence à la fois le potentiel quantitatif (intervalle 1 à 5 irrigations.an⁻¹) et qualitatif (intervalle 0 à 4 irrigations.an⁻¹) de production de dattes (Fig. 6.8(a) et 6.8(b)). En conditions favorables (4 irrigations hivernales.an⁻¹), des potentiels maximums quantitatif et qualitatif respectivement de 90 kg.pied⁻¹ et de 90% peuvent être atteints, que nous retenons comme 'potentiels absolus'. Toutefois, une diminution de la fréquence des irrigations hivernales de 3 à 1 fois.an⁻¹ peut induire à elle seule une perte 30 kg.pieds⁻¹ du potentiel quantitatif, et de 20% du potentiel qualitatif. Nous pouvons ainsi observer une pente de diminution plus accentuée au niveau du potentiel quantitatif que celle au niveau du potentiel qualitatif.

(ii) La fréquence des irrigations estivales influence le potentiel qualitatif (intervalle 2 à 5 irrigations.an⁻¹) (Fig. 6.8(c)). Un potentiel absolu de 90% peut être atteint en conditions d'irrigation favorables. Cependant, des irrigations non fréquentes en saison estivale (≤ 3 fois) engendrent des pertes considérables du potentiel qualitatif. La perte du potentiel peut atteindre

40% du poids total de dattes produites avec la diminution de la fréquence des irrigations estivales de 5 à 2 fois.an⁻¹.

(iii) La figure 6.9 illustre la variabilité des potentiels de production quantitative (6.9 (a)) et qualitative (6.9 (b)) en fonction de la durée d'irrigation. Dans ces représentations, nous avons choisi de ne pas figurer les 0.02% de parcelles caractérisées ayant une durée annuelle d'irrigation > 300 h.ha⁻¹. L'étude de l'allure du potentiel quantitatif en fonction de la durée d'irrigation est peu concluante. Toutefois, l'étude de l'allure de la courbe enveloppe qui décrit l'évolution du potentiel qualitatif montre une augmentation du potentiel pour atteindre un plafond où il a tendance à être stationnaire malgré l'augmentation importante de la durée d'irrigation. Pour les faibles durées d'irrigation annuelle (<100 h.ha⁻¹), la pente d'augmentation du potentiel qualitatif avec la durée d'irrigation est très forte. Ainsi, lorsque la durée annuelle d'irrigation n'est pas limitante, au-delà 100 h.ha⁻¹, le potentiel qualitatif est plafonné à 85% du poids total. De plus, une diminution de la durée d'irrigation de 100 à 50 h.ha⁻¹ occasionne une perte de 20% du potentiel de production de dattes branchées.

(2) L'effet conjugué de la durée d'irrigation annuelle et la fréquence des irrigations hivernales montre qu'en moyenne, la quantité de dattes produites diminue significativement de 36.5 à 29.5 kg.pied⁻¹ alors que la perte de production de dattes branchées à la faveur de dattes en vrac et des déchets augmente significativement de 61.7 à 73.1% pour respectivement une fréquence élevée (3 à 5 fois) et faible (0 à 2 fois) des irrigations hivernales. D'autre part, des durées d'irrigations annuelles importantes (150 à 425 h.ha⁻¹) favorisent des rendements quantitatif et qualitatif les plus élevés avec respectivement 39.9 kg.pied⁻¹ et 40.8% du rendement total. Des irrigations annuelles entre 100 et 150 h.ha⁻¹ favorisent une moyenne quantitative 29 kg.pied⁻¹ une moyenne qualitative de 29.9%. Les durées d'irrigations annuelles faibles (10 à 50 h.ha⁻¹) limitent la production quantitative des dattes à 30.1 kg.pied⁻¹ et une dégradation plus poussée de la qualité où seulement 27.1% du rendement total peut être valorisé sous forme de dattes branchées.

En conclusion, la durée d'irrigation annuelle n'est limitante que lorsqu'elle est très faible (< 50 h.ha⁻¹). Plus généralement, c'est la fréquence des irrigations qui est déterminante de la quantité et de la qualité des dattes produites. Ainsi, la quantité de dattes est plus sensible à la fréquence des irrigations hivernales, alors que la qualité est sensible à la fois à la fréquence des irrigations estivales mais aussi celles hivernales.

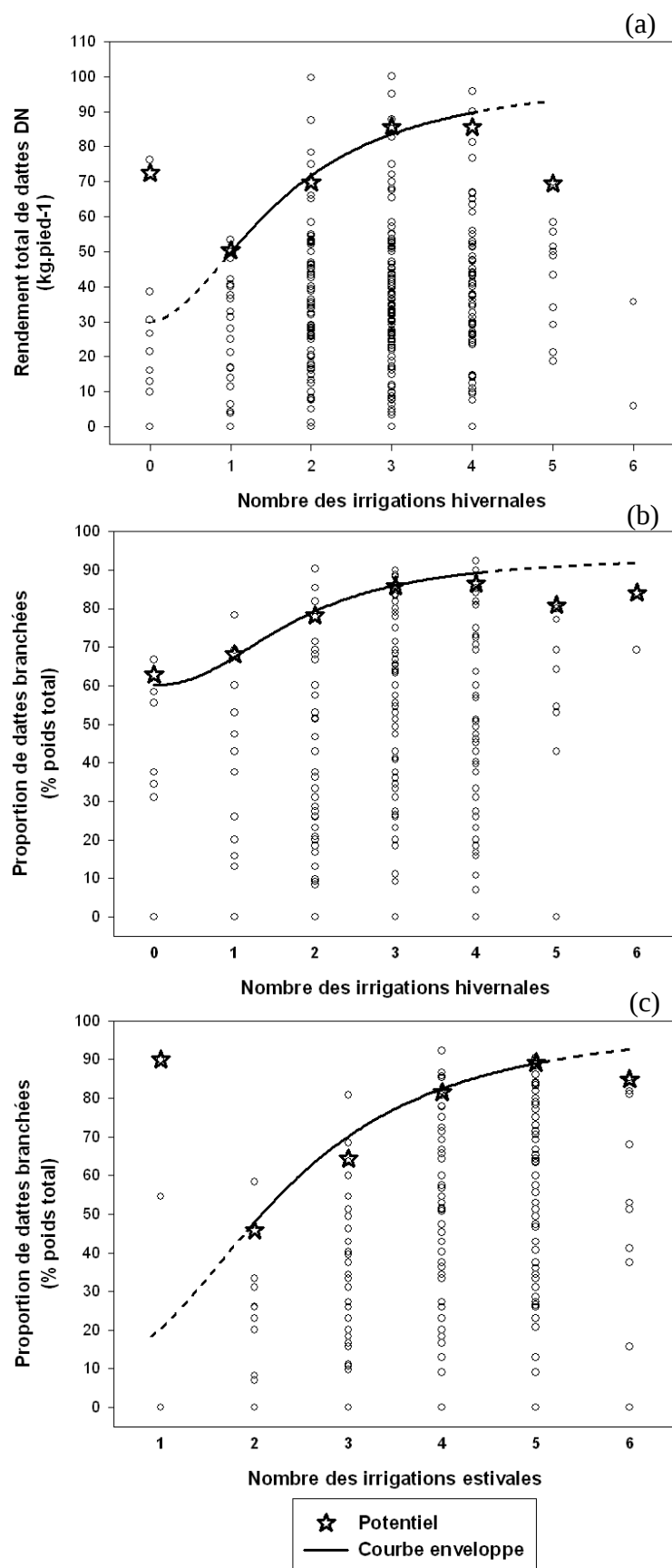


Figure 6.8 : Influence du nombre des irrigations estivales et hivernales sur les potentiels qualitatifs et quantitatifs de production de dattes.

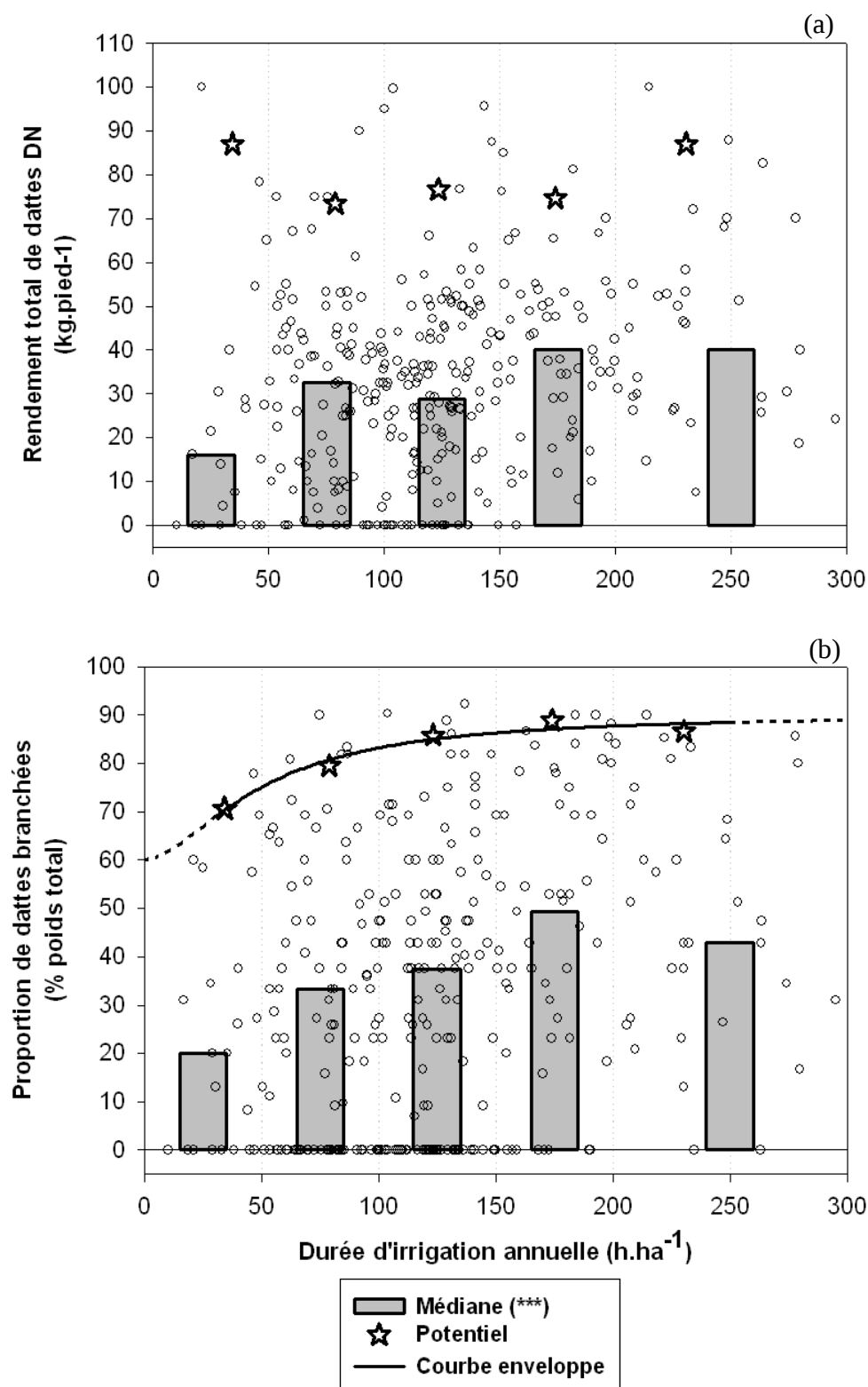


Figure 6.9 : Influence de la durée d'irrigation sur les performances, médianes et potentielles, quantitatives (a) et qualitatives (b) des pieds Deglet Nour.

6.3.3.3 Influence de la salinité du sol et de la fréquence des amendements sableux

Les effets individuels et combinés de la salinité de la couche superficielle du sol (0-100 cm) et de la fréquence des amendements sableux sont hautement significatifs sur les performances, quantitatives et qualitatives, potentielles et moyennes des pieds Deglet Nour.

(1) L'étude de la variabilité du potentiel de production de dattes en fonction de la conductivité électrique du sol est illustrée sur la figure 6.10. L'allure des courbes des potentiels quantitatifs et qualitatifs montre trois phases caractérisant la réponse potentielle du palmier dattier : une première phase permettant de distinguer un seuil de la conductivité électrique du sol au dessous duquel le rendement potentiel en quantité et en qualité n'est pas affecté, c'est le potentiel absolu. Au dessus de ce seuil, le potentiel décroît sensiblement avec la conductivité électrique jusqu'à atteindre un deuxième seuil au-delà duquel la décroissance du rendement est faiblement affectée par l'augmentation de la salinité du sol. L'examen de la figure 6.10(a) montre qu'un potentiel absolu (100% du potentiel) de 100 kg.pied⁻¹ peut être atteint au-deçà 10 dS.m⁻¹ et qu'une conductivité électrique au-delà de 24 dS.m⁻¹ occasionne à elle seule une perte ≥ 50 kg.pied⁻¹ du potentiel de production de dattes. De la même manière, la figure 6.10(b) montre que le potentiel qualitatif est faiblement sensible à la salinité du sol au-deçà de 12 dS.m⁻¹. Quant à une conductivité électrique >24 dS.m⁻¹, elle occasionne un potentiel de production de dattes branchées $< 50\%$.

(2) L'examen de l'influence de la fréquence des amendements sableux sur les potentiels quantitatif et qualitatif (Fig. 6.11) montre qu'une fréquence très faible ou encore très élevée de travail du sol a tendance à diminuer les potentiels de production de dattes. Cette influence est plus marquée au niveau du potentiel quantitatif. La figure 6.11(a) montre qu'un potentiel absolu de 80 kg.pied⁻¹ peut être atteint au niveau des parcelles amendées tous les quatre ou cinq ans. Ce potentiel décroît significativement au-delà ou au deçà de cette fréquence dite optimale pour atteindre 70 kg.pied⁻¹ lorsque la fréquence est très élevée (3 ans) ou encore 50 kg.pied⁻¹ quand la fréquence des amendements devient très faible (10 ans), De la même manière, une décroissance de 12 kg.pied⁻¹ par rapport au potentiel absolu est due seulement à une fréquence très élevée de travail du sol (3 ans). Quant au potentiel qualitatif (Fig. 6.11(b)), l'optimum absolu est de 90% et est observé pour une fréquence de 3 à 4 années. Quand la fréquence devient très faible (10 ans) nous notons seulement une perte de 20% du potentiel de production de dattes branchées.

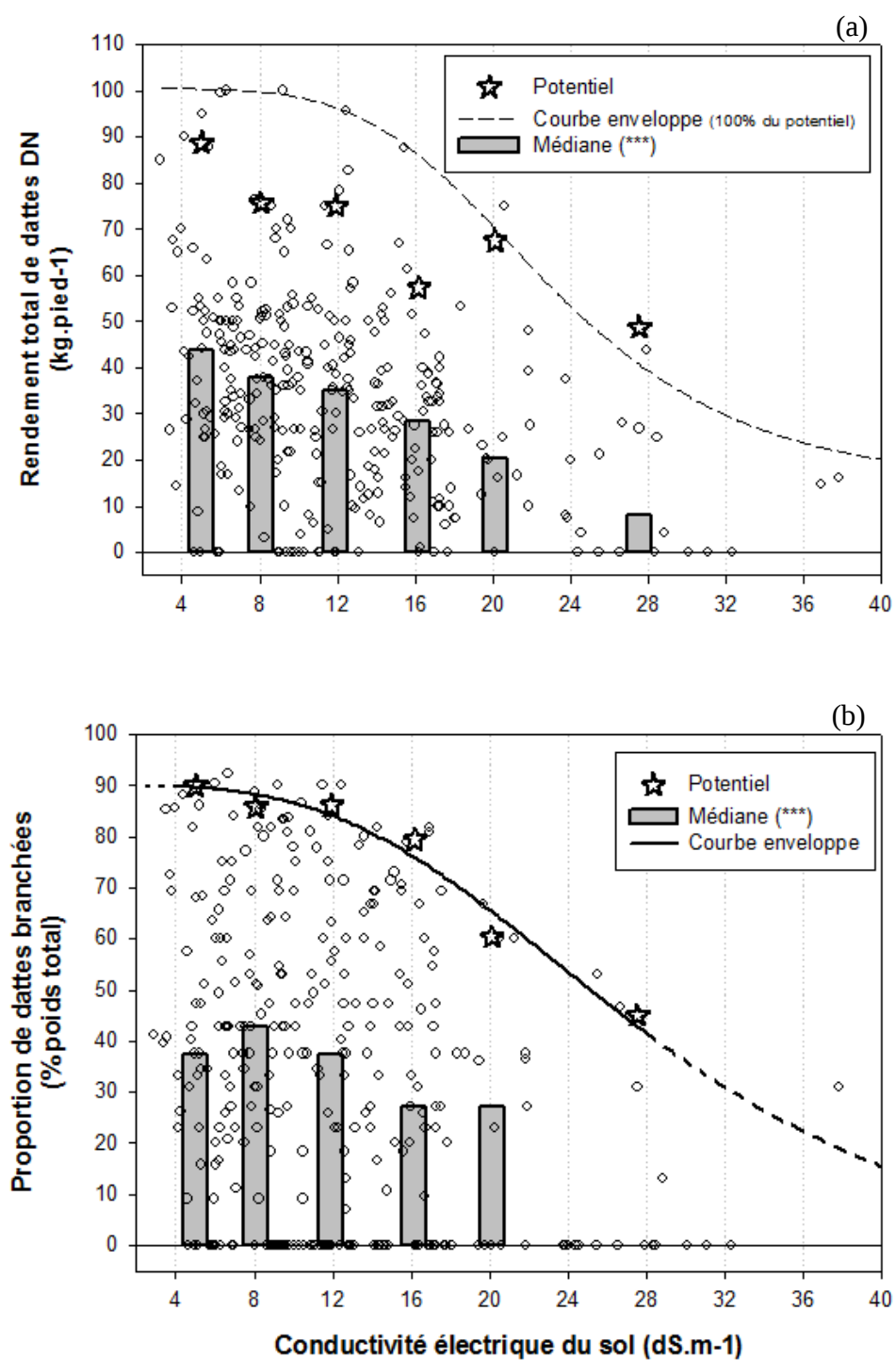


Figure 6.10 : Influence de la salinité du sol sur les performances, médianes et potentielles, quantitatives (a) et qualitatives (b) du palmier dattier.

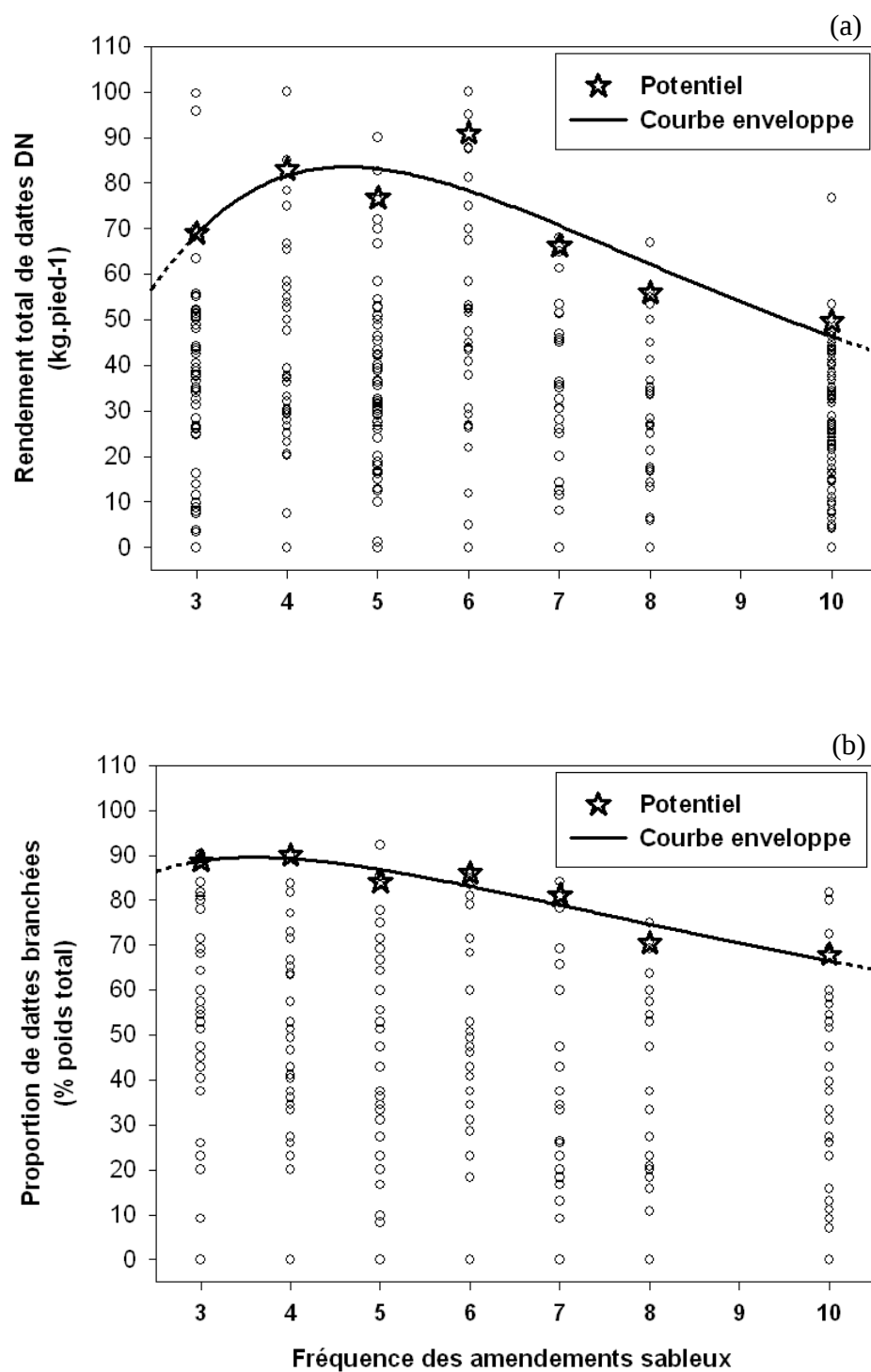


Figure 6.11 : Effet de la fréquence des amendements sur les potentiels quantitatifs (a) et qualitatifs (b) des pieds Deglet Nour.

(3) Effet combiné de la salinité du sol et de la fréquence des amendements sableux : Pour cette analyse, nous avons considéré deux classes pour les apports d'amendements sableux : (i) fréquence élevée (3 à 5 années), et (ii) fréquence faible (≥ 6 ans). L'ANOVA deux facteurs (salinité du sol x fréquence des amendements sableux) montre qu'en moyenne, la quantité de dattes produites augmente significativement avec la fréquence des amendements : de 26 à 32.6 kg.pied⁻¹, respectivement. La perte moyenne de production de dattes branchées liée à la fréquence des amendements est respectivement de 77.1% pour une fréquence faible et de 67.5% du rendement total pour une fréquence élevée. Les quantités et les qualités moyennes de dattes observées au niveau des parcelles les moins salées (2 à 10 dS.m⁻¹) représentent le double de celles observées au sein des parcelles très salées (18 à 50 dS.m⁻¹) où les rendements sont respectivement 21 et 40 kg.pied⁻¹ et les pourcentages de production de dattes branchées sont 20% et 40% respectivement.

En conclusion, au-delà de 12 dS.m⁻¹, la salinité du sol commence à dégrader la quantité et la qualité des dattes. De plus, la fréquence des amendements sableux reliés au travail du sol affecte la production de dattes en termes de quantité et de qualité avec une fréquence optimum requise de 4 à 5 années.

6.3.3.4 Influence de la profondeur de la nappe

L'analyse de l'influence de l'indicateur d'engorgement sur les performances du palmier dattier montre un effet hautement significatif (au seuil 0.1%) sur la qualité des dattes et significatif (au seuil de 5%) sur la quantité de dattes produites (Tab. 6.1).

(1) Le potentiel quantitatif semble augmenter avec la profondeur de la nappe (Fig. 6.12(a)). Un potentiel absolu de 100 kg.pied⁻¹ est observé quand la nappe est très profonde (>1.25 m). Alors qu'une position très superficielle de la nappe (<0.75 m) occasionne un potentiel de 65 kg.pied⁻¹. Toutefois, l'étude de l'influence de la profondeur de la nappe en saison hivernale sur le potentiel qualitatif (Fig. 6.12(b)) montre un comportement différent du potentiel quantitatif. En effet, le potentiel a tendance à se dégrader pour une position superficielle comme pour une position très profonde de la nappe. Un potentiel absolu de 90% est observé pour une profondeur entre 0.75 et 1.10 m. Alors qu'une position très superficielle (0.55 m) de la nappe peut à elle seule engendrer une perte de 25% du potentiel absolu. Une nappe très profonde (> 1.10 m) a aussi une tendance à dégrader le potentiel de production de dattes branchées, soit une perte de 10% du potentiel absolu quand la nappe atteint 1.35 m en saison hivernale.

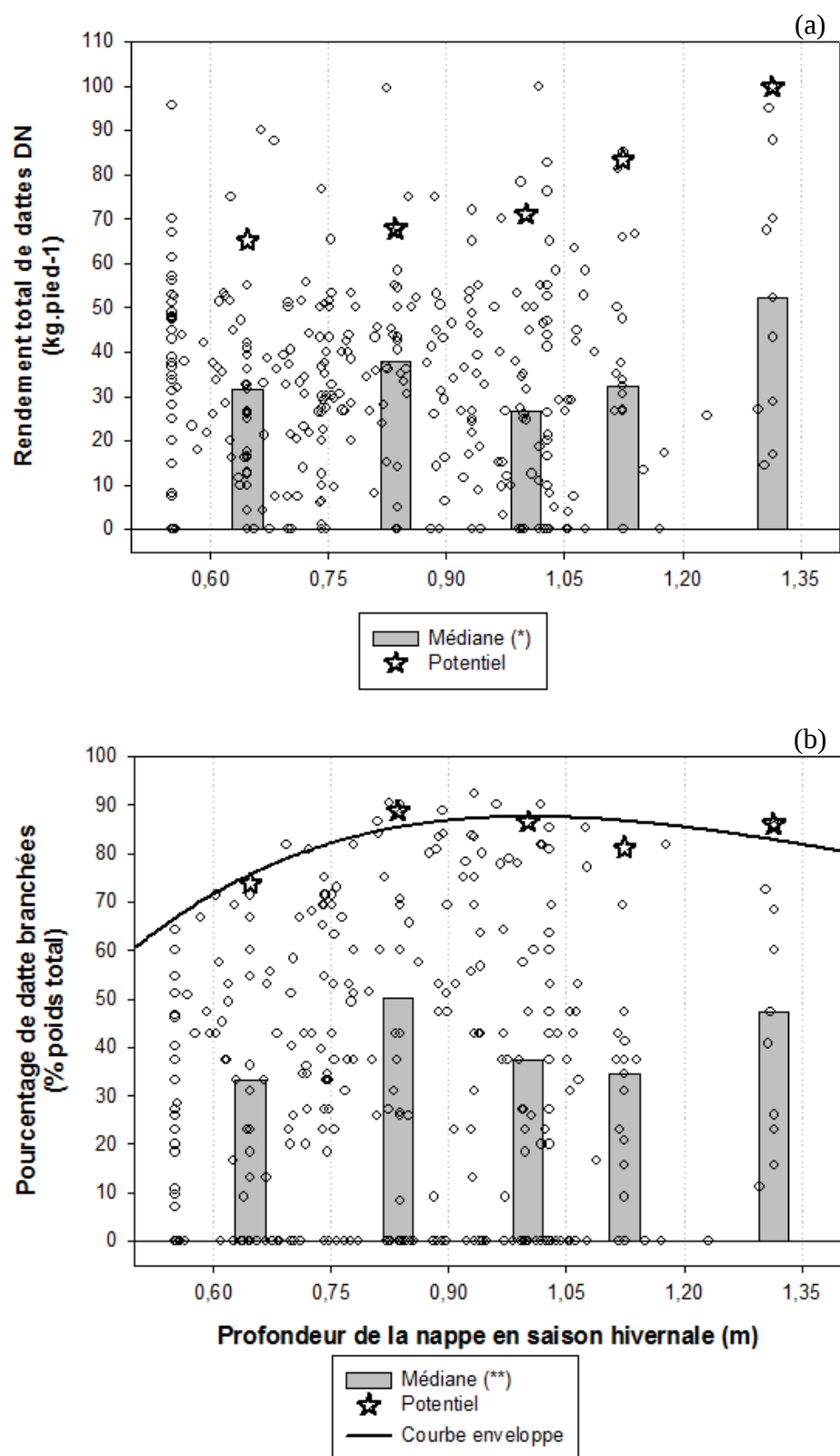


Figure 6.12 : Influence de la profondeur de la nappe sur les performances, médianes et potentielles, quantitatives (a) et qualitatives (b) des pieds Deglet Nour.

(2) La réponse du potentiel qualitatif du palmier dattier à la contrainte d'engorgement combinée à l'effet de la durée annuelle d'irrigation est présentée sur la figure 6.13. Dans cette représentation, nous avons considéré deux populations séparées par une profondeur seuil de 0.75 m. Nous observons qu'une position relativement profonde de la nappe en saison hivernale (> 0.75 m) favorise un meilleur potentiel de production de dattes branchées (90% du poids total) quand l'irrigation n'est pas limitante c.-à-d. pour des durées annuelles ≥ 100 h.ha⁻¹. Dans cette catégorie de nappe profonde et quand la durée d'irrigation devient limitante, une perte additionnelle de 10% du potentiel est observée pour une durée annuelle de 50 h.ha⁻¹. Par contre malgré des irrigations non limitantes la proportion de production de dattes branchées n'est que de 70% quand la nappe est très superficielle. Nous pouvons ainsi observer (i) systématiquement une perte de 20% du potentiel de production de dattes branchées qui est due seulement à la position sub-affleurante de la nappe pour des durées d'irrigation ≥ 50 h.ha⁻¹, et que (ii) malgré des irrigations favorables (> 150 h.ha⁻¹) le potentiel est plafonné à 70% quand la nappe est superficielle et à 90% quand la nappe est plus profonde.

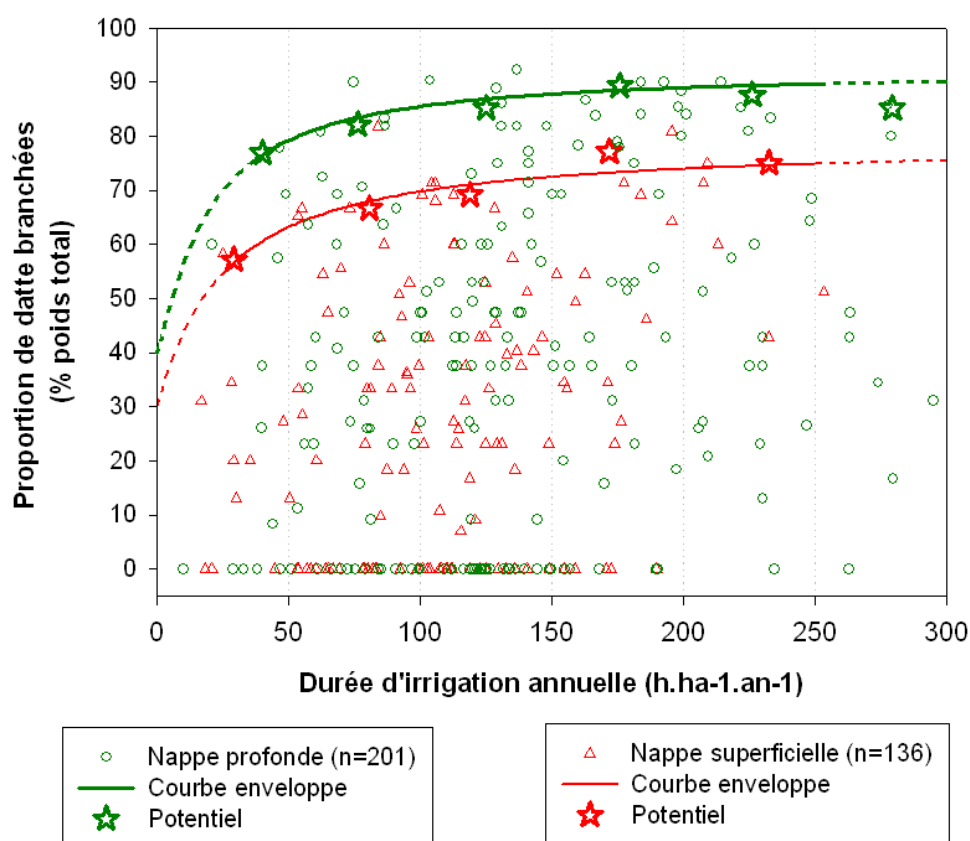


Figure 6.13 : Effet conjugué (profondeur de la nappe x durée d'irrigation annuelle) sur le potentiel qualitatif des pieds Deglet Nour.

En conclusion, une position superficielle de la nappe dégrade la quantité et la qualité des dattes. Toutefois, une position très profonde a tendance à dégrader la qualité des dattes même si la quantité n'est pas affectée. En d'autres termes, une position superficielle comme une position très profonde de la nappe occasionne la production de dattes en vrac et de déchets à la faveur de dattes branchées. De plus, la dégradation du potentiel qualitatif lorsque la nappe est superficielle est importante même si la durée d'irrigation annuelle n'est pas limitante.

6.3.3.5 Influence de la conduite de palmeraie et de la densité plantation

Les effets de la conduite de la palmeraie et de la densité de plantation sont significatifs à la fois sur la quantité et la qualité de dattes Deglet Nour.

(1) L'examen de la variabilité des potentiels de production en termes de quantité et de qualité des dattes (Fig. 6.14) montre : (i) que le potentiel quantitatif le plus élevé est observé au sein des plantations modernes, soit 90 kg.pied^{-1} , suivi de très près par les plantations moyennement productives (85 kg.pied^{-1}). Et qu'une dégradation systématique de 10 kg.pied^{-1} est observée en passant successivement de l'une à l'autre conduite de palmeraie : des plantations moyennement productives à des plantations traditionnelles, à des plantations à conduite de survie, et à des plantations jeunes où le potentiel n'est que 55 kg.pied^{-1} ; et que (ii) la conduite de survie se distingue nettement des autres conduites de plantation quand nous regardons le potentiel qualitatif avec un potentiel de 60% comparée à la conduite intensive (90%), ou traditionnelle (85%), ou encore jeune (80%).

(2) L'effet de la densité de plantation sur les performances potentielles du palmier dattier montre une sensibilité plus marquée du potentiel quantitatif (Fig. 6.15(a)) que celui qualitatif (Fig. 6.15(b)). L'examen de ces deux figures montre une densité optimum entre 150 et 200 pieds.ha⁻¹ pour laquelle les potentiels quantitatif et qualitatif sont à leurs maximums, soit respectivement 90 kg.pied^{-1} et 85%, des plantations moins denses ou encore plus denses dégradent les potentiels de production du palmier dattier avec une dégradation est plus accentuée pour le potentiel quantitatif.

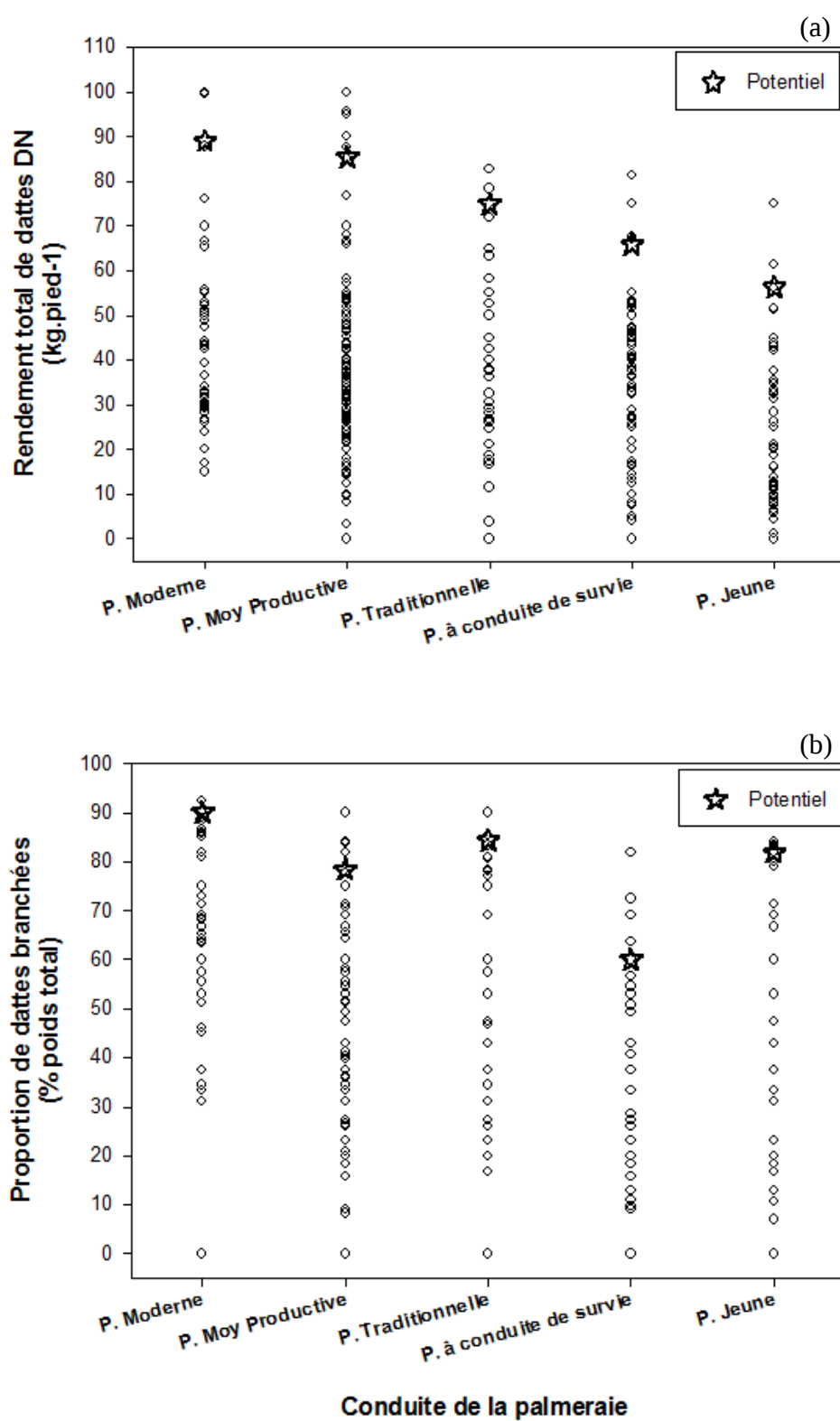


Figure 6.14 : Influence de la conduite de palmeraie sur le potentiel quantitatif (a) et qualitatif (b) des pieds Deglet Nour.

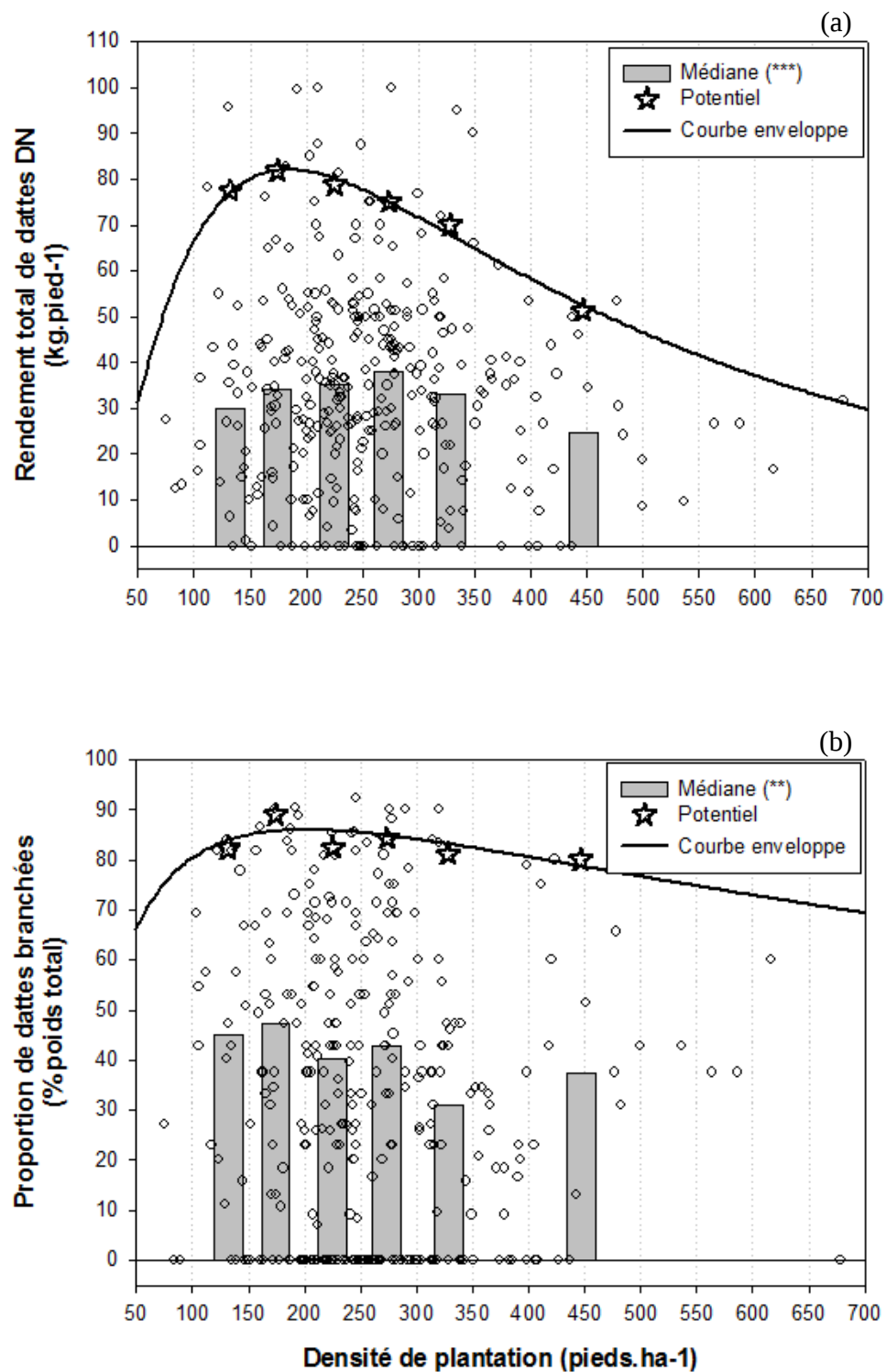


Figure 6.15 : Influence de la densité de plantation sur les performances, médianes et potentielles, quantitatives (a) et qualitatives (b) des pieds Deglet Nour.

(3) L'ANOVA deux facteurs (conduite de la palmeraie x densité de plantation) montre un effet hautement significatif de la conduite de palmeraie sur les performances quantitatives et qualitatives du palmier dattier quant à l'effet de la densité de plantation, il devient insignifiant au sein du MGL des performances qualitatives (Tab. 2, annexe). Dans cette analyse, nous avons considéré trois groupes de palmeraies : les palmeraies à conduite intensive regroupant les palmeraies modernes, traditionnelles et non traditionnelles ; les palmeraies à conduite de survie, et celles jeunes ; et les palmeraies à conduite extensive. Les résultats montrent que les moyennes quantitative et qualitative sont significativement élevées au sein des palmeraies à conduite intensive, soit respectivement $37.5 \text{ kg.pied}^{-1}$ et 44% du poids total de dattes. Au sein des palmeraies à conduite de survie et celles jeunes, les quantités moyennes de dattes sont respectivement 25.5 et $18.92 \text{ kg.pied}^{-1}$. Par contre la perte de qualité est plus élevée au sein des palmeraies à conduite de survie comparée à celles jeunes, soit respectivement 81.2 et 73.8% du poids total de dattes. D'autre part, les rendements les plus élevés sont observés dans les palmeraies à plantations moyennement denses (250 à 300 pieds.ha⁻¹) soit une moyenne de 36 Kg.pied^{-1} ; alors que le pourcentage de dattes branchées le plus élevé est observé au sein des plantations moins denses (150 à 200 pieds.ha⁻¹), soit 35.8% du poids total.

L'étude de l'influence de la conduite de palmeraie et de la densité de plantation sur les performances des pieds Deglet Nour nous permet de tirer les conclusions suivante : (i) les performances quantitatives et qualitatives les plus élevées sont observées pour une conduite intensive et une densité optimale de 150 à 200 pieds.ha⁻¹, (ii) la conduite de survie est identifiée comme la conduite qui dégrade le plus le potentiel qualitatif même si le potentiel quantitatif reste relativement élevé (65 kg.pied^{-1}), (iii) les plantations jeunes restent les moins productives en terme de quantité, et (vi) les plantations très denses affectent les performances quantitatives même si les performances qualitatives semblent être moins sensibles.

6.4 Discussion

6.4.1 Une sensibilité différenciée des performances quantitatives et qualitatives

L'analyse a porté sur huit indicateurs caractérisant l'état du milieu physique, les pratiques et les stratégies des agriculteurs : la durée d'irrigation annuelle, la fréquence des irrigations hivernales, la fréquence des irrigations estivales, la salinité du sol, la fréquence des amendements sableux, l'engorgement, le type de palmeraie et la densité de plantation. Les performances des palmeraies en termes de quantité totale de dattes produites et de proportion de dattes branchées sont sensibles à l'ensemble de ces facteurs étudiés. Cependant, certains facteurs ont un effet plus prononcé sur l'un que sur l'autre indicateur de performance des pieds Deglet Nour. Ainsi : (i) la durée d'irrigation annuelle et l'engorgement impactent la qualité et peu la quantité ; alors que (ii) la fréquence des irrigations hivernales, la fréquence des amendements sableux, la conduite de palmeraie et la densité de plantation influencent plus la quantité de dattes que leur qualité ; (iii) quant à la salinité du sol, elle affecte de la même intensité la quantité et la qualité des dattes, alors que (vi) la fréquence des irrigations estivales n'impacte pas la quantité et devient très déterminante de la qualité des dattes. Nous pouvons ainsi déduire que les irrigations hivernales seraient décisives dans la détermination du nombre et du volume des régimes quant aux irrigations estivales elles seraient décisives dans la détermination de la qualité des dattes.

6.4.2 Un retour sur la démarche méthodologique

Avantages et limitations méthodologiques. Conformément aux hypothèses préétablies ayant orienté notre choix d'indicateurs pour étudier la variabilité des performances agronomiques à l'échelle de l'oasis, les corrélations entre les facteurs du milieu physique et leur influence sur le palmier dattier dans les conditions du milieu réel ont été déterminées selon deux analyses complémentaires.

Les analyses de variance nous ont permis de détecter, dans un premier temps, les auto-corrélations des variables décrivant l'état du milieu (la conduite de l'irrigation, salinité du sol, engorgement) à mesure de rendre explicite les relations de causalités. Ces analyses nous ont permis, dans un second temps, de déterminer les facteurs limitants clés qui influencent les performances du palmier dattier. Etant donné que les facteurs limitants sont fortement liés, nous avons procédé par tester, d'abord, leur effet individuel un à un, ensuite, l'effet combiné des deux facteurs liés dans une analyse de variance à deux facteurs. Les effets de l'ensemble des ces facteurs limitants des performances des pieds Deglet Nour semblent être additifs. Toutefois, la

principale limitation de ces analyses résulte dans la difficulté d'établir des liaisons entre l'ensemble des facteurs limitants, et donc de les hiérarchiser.

La méthode de courbe enveloppe nous a permis d'analyser et de quantifier les pertes des potentiels quantitatifs et qualitatifs du palmier dattier Deglet Nour dues à chacun des facteurs biophysiques et certaines pratiques des agriculteurs pris individuellement, une seule combinaison de deux facteurs a été possible. La principale limitation de la méthode concerne les anomalies du potentiel observées dans des conditions limitantes ou favorables. Il s'agit notamment de l'influence de la conduite de l'irrigation en termes de durée d'irrigation et de fréquence des irrigations hivernales et estivales. En effet, (i) dans des conditions très limitantes (très faibles fréquence des irrigations hivernales, ou estivales ou faible durée d'irrigation), nous avons observé des potentiels élevés ; (ii) ou encore pour des conditions favorables de conduite de l'irrigation, nous avons observé une dégradation du potentiel. Pour expliquer ces anomalies, nous avons tout d'abord noté un faible effectif de parcelles dans ces conditions. De plus, les observations de terrain nous permettent d'avancer deux types d'arguments : (i) l'effet de proximité où des parcelles de faibles surfaces pourraient être influencées par les pratiques des parcelles avoisinantes ce qui favoriserait un potentiel élevé en dépit d'une conduite d'irrigation défavorable, et (ii) seulement l'antenne 1 offre les meilleures conditions d'irrigation, toutefois, l'âge du palmier dattier est très élevé (Fig. 2.5) d'où un potentiel faible de production des dattes malgré une conduite d'irrigation favorable. Néanmoins, cette méthode reste plus robuste que les analyses de variances vu la grande dépendance des facteurs déterminants et le risque d'attribuer à un facteur limitant un poids qui revient à un autre facteur qui en dépend.

L'originalité de notre travail tient ainsi à la combinaison de deux approches d'analyses mais aussi à sa réalisation dans un milieu où les performances du palmier dattier dépendent d'une combinaison de facteurs liés au milieu physique et aux pratiques et stratégies des agriculteurs. Or, la quasi-totalité des travaux traitant les performances du palmier dattier ont concerné l'effet de l'alimentation hydrique et/ou de la salinité du sol et ont été réalisés en milieu contrôlé où l'ensemble des autres facteurs est fixé à des valeurs non limitantes. Ces travaux aboutissent au calage de modèles dont l'application reste difficile. Il s'agit notamment des travaux réalisés sur la salinité et compilés par la FAO (Ayers & Westcot, 1985) ou encore les travaux de Shani et al. (2005).

Analyse de variance vs. courbe enveloppe. Des écarts importants ont été observés entre les performances médianes ou moyennes et les performances potentielles. Par exemple, lorsque les

irrigations estivales sont fréquentes (≥ 4 fois) le potentiel qualitatif varie de 80 à 90% du poids total de dattes alors que la médiane n'est que de 42.9%. De la même manière pour des classes de salinités faibles (2 à 6 dS.m⁻¹), les potentiels quantitatif et qualitatif observés sont respectivement de 100 kg.pieds⁻¹ et 90%, alors que les valeurs médianes n'étaient que de 43.7 kg.pieds⁻¹ et 37.5%, respectivement. Ou encore quand la conduite moderne de la palmeraie favorise des potentiels de production de 90 kg.pieds⁻¹ et 90%, les médianes ne sont que 43.7 kg.pieds⁻¹ et 24.7%. Cette faible performance moyenne observée est due à l'intégration de l'effet des autres facteurs étudiés, mais aussi qui pourrait être liée à d'autres facteurs non intégrés dans cette étude, tels que l'effet des conditions climatiques (vitesse du vent ou la pluie au moment de la pollinisation), ou alors l'effet de proximité des parcelles à conduite intensive, ou encore la pratique de ciselages, etc. Quant à la méthode des courbes enveloppe elle permet d'étudier l'effet d'un facteur limitant en excluant l'effet des autres facteurs, étudiés ou non, sur le potentiel de production.

En conditions du milieu réel, les fortes corrélations observées entre certaines variables limitent l'application de la méthode d'analyse de variance à deux facteurs. Dans cette analyse deux situations concernant les analyses de variance à deux facteurs sont observées : (i) dans un premier cas quand les variables sont corrélées, l'un des effets est significatif quand il est pris individuellement mais ne l'est plus quand il est combiné à un deuxième qui en dépend. C'est le cas de la profondeur de la nappe et de la salinité du sol qui, pris un à un, ont un effet significatif sur les performances quantitative et qualitative, mais combinées, l'effet de la profondeur de la nappe pour expliquer la variance est occulté. Ainsi, la salinité du sol semble expliquer la plus grande partie de la variance. Et (ii) dans un deuxième cas, l'effet des deux variables considérées pour expliquer la variabilité des performances quantitatives et qualitatives est significatif mais leur interaction ne l'est pas. C'est le cas de toutes les analyses à deux facteurs considérées. Cela semble indiquer que les effets s'ajoutent simplement sous la forme d'un modèle de type « additif ».

La méthode de courbes enveloppes nous a permis d'analyser l'effet conjugué de deux facteurs sur les performances du palmier dattier : L'effet combiné de (durée d'irrigation x profondeur de la nappe) sur le potentiel qualitatif nous a permis : (i) d'expliquer l'effet de leur interaction (ii) de quantifier la perte du potentiel due à chaque facteur pris individuellement, et (iii) déterminer le facteur dominant en fonction des seuils observés. Ainsi, nous avons observé que malgré des durée d'irrigation non limitantes (≥ 100 h.ha⁻¹), une nappe très superficielle (<0.75 m) peut à elle

seule dégrader de 20% le potentiel de production de dattes de bonne qualité. De plus, la représentation graphique de l'interaction des deux facteurs montre que l'effet de la durée d'irrigation s'additionne à l'effet de la nappe (la pente à l'origine du repère n'est pas la même pour les deux populations).

Par rapport à une ANOVA deux facteurs, cette analyse nous a permis ainsi d'étudier l'effet de l'interaction des deux facteurs. Toutefois, c'est le seul exemple qui a donné des résultats significatifs. Les autres cas comme l'effet de la durée d'irrigation en considérant deux populations de fréquence des irrigations hivernales (< 3 et ≥ 3 fois.an⁻¹), ou l'effet de la conductivité électrique en considérant deux populations de fréquence des amendements sableux (≤ 5 et > 5 ans), ou encore l'effet de la densité de plantation en considérant trois familles de conduite de palmeraie (intensive, extensive et de survie) sur les potentiels quantitatifs et qualitatifs ne sont pas concluants surtout suite aux faibles effectifs dans les condition limitantes.

6.5 Conclusion

Cette étude a pour objectif d'étudier les performances quantitatives et qualitatives des palmeraies sous la dépendance d'une combinaison de facteurs liés à la culture, au sol, et un ensemble de pratiques et de stratégies des agriculteurs. Ainsi, ce travail a nécessité tout d'abord la compréhension du fonctionnement d'un milieu complexe où la conduite de l'irrigation, les contraintes de salinité, d'engorgement et de dégradation de la qualité du sol, et les facteurs agronomiques (densité et âge de plantation) sont extrêmement dépendants. Et ensuite, l'évaluation selon deux approches statistiques complémentaires de l'effet de cet ensemble en interaction sur les performances des pieds Deglet Nour.

Les analyses ont porté sur huit indicateurs à savoir la durée d'irrigation annuelle, la fréquence des irrigations hivernales, la fréquence des irrigations estivales, la salinité du sol, la fréquence des amendements sableux, l'engorgement, le type de palmeraie et la densité de plantation ayant des effets significatifs sur l'un ou les deux indicateurs de performance des pieds Deglet Nour : quantité de dattes produite et proportion de dattes branchées. Les résultats ont montré que la performance en terme production de dattes branchées est plus sensible aux contraintes étudiées que la production totale de dattes. Les effets des différents facteurs limitants semblent s'additionner et font que les productions réelles restent loin des potentiels de production quantitative et qualitative. De plus, les résultats ont montré que (i) l'irrigation, en matière de durée et donc de dose, à elle seule ne suffit pas pour avoir une bonne qualité des fruits, une

certaine fréquence des irrigations en été comme en hiver, (ii) un certain degré d'intensification est requis notamment en matière de travail du sol, des amendements sableux et organiques et d'entretien du palmier dattier, et (iii) les bonnes conditions du milieu physique en terme de salinité et de drainage sont aussi nécessaires.

Ce travail constitue une contribution à la compréhension d'un système oasien complexe. La principale limitation de ce travail en terme méthodologique résulte de la difficulté d'établir des liaisons entre tous les facteurs limitants et de prendre en compte simultanément cet ensemble de facteurs qui semblent intervenir sur les performances du palmier dattier, et ainsi de les hiérarchiser afin de spécifier les priorités d'intervention. De la même manière, en terme expérimental, l'élargissement de l'analyse sur plusieurs années pour représenter plusieurs conditions climatiques associés et un approfondissement du fonctionnement éco-physiologique du peuplement végétal sous différentes contraintes du milieu physique semblent aussi nécessaires.

RECOMMANDATIONS POUR AMELIORER LES PERFORMANCES DES PALMERAIES

Dans l'oasis de Fatnassa, le maximum absolu du potentiel de production de dattes observé est de 100 kg.pied⁻¹ Deglet Nour. Au maximum 92% du poids total peut être valorisable sous forme de dattes branchées avec une perte absolue minimum de 8% sous forme de dattes en vrac et de déchets utilisés comme aliments pour le bétail. Toutefois, seulement quelques rares exploitations atteignent ces potentiels en quantité et en qualité de dattes. Ci-après des recommandations pour améliorer les performances des palmeraies.

La conduite de l'irrigation vs. tour d'eau : augmenter la fréquence du tour d'eau pour améliorer la performance quantitative et qualitative du palmier dattier. De l'analyse de la sensibilité du palmier dattier à la conduite d'irrigation nous retenons que (i) les potentiels quantitatifs et qualitatifs sont très vite plafonnés (≥ 75 kg.pieds⁻¹ et $\geq 80\%$) à partir du seuil de durée d'irrigation annuelle de 100 h.ha⁻¹.an⁻¹ ; et que (ii) ces potentiels sont très sensibles à la fréquence des irrigations e.g. ils décroissent respectivement 90 à 60 kg.pied⁻¹ pour des fréquences de 3 à 1 irrigation hivernale et de 90 à 50% pour des fréquences de 5 à 2 irrigations estivales. Les agriculteurs pratiquant des irrigations hivernales comme estivales fréquentes, dès que le tour d'eau le permet, sont conscients de l'importance de cette pratique. Des études similaires en Iraq ont aussi souligné l'importance de cette pratique hivernale à condition de respecter une certaine fréquence pour une utilisation efficiente de la ressource en eau (Saeed et al., 1990).

Malgré l'importance de la fréquence des irrigations, l'étude de la gestion individuelle et collective de l'irrigation dans l'oasis de Fatnassa a montré une faible fréquence des irrigations allouées par le tour d'eau surtout en saison estivale (Chap. 5). Alors qu'en saison hivernale quand l'irrigation est à la demande des agriculteurs, ces derniers optent souvent pour des irrigations irrégulières où nous avons noté que 41.2% des parcelles dans l'oasis de Fatnassa sont rarement irriguées en hiver (0 à 2 fois).

Pour améliorer la productivité des ressources utilisées, une augmentation de la fréquence des irrigations estivales et une incitation à la pratique des irrigations hivernales sont des recommandations clés. Ces deux pratiques ont montré leur importance non seulement dans la satisfaction des besoins hydrique du palmier dattier mais aussi pour des fins de lessivage. Pour ce faire, les agriculteurs de Fatnassa ont intérêt à respecter la règle collective d'irrigation à la parcelle surtout que nous avons mis en évidence un dépassement excessif de cette règle avec des

durées d'irrigation longues (Chap. 5 § 5.3.3). De plus, tenant compte des caractéristiques actuelles du réseau d'irrigation (débit et efficience), le seuil d'une durée d'irrigation annuelle de $100 \text{ h.ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ pour atteindre des seuils de performance quantitatif et qualitatif élevés ($\geq 70 \text{ kg.pieds}^{-1}$ et $\geq 85\%$) paraît compatible avec une valeur d'évapotranspiration réelle estimée à $10,090 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (Marlet et al., 2009). Une fréquence élevée des irrigations est habituellement recommandée pour les sols sablonneux à forte infiltrabilité, tel que les sols de Fatnassa, où les durées d'irrigation élevées peuvent engendrer des pertes d'eau dans la nappe.

Le travail du sol s'impose...mais pas très fréquemment ! La fréquence du travail du sol accompagné des amendements sableux a montré des effets plus marqués sur le potentiel quantitatif que qualitatif. Les raisons des amendements telles qu'elles sont exprimées par les agriculteurs ne permettent pas d'identifier et distinguer si les effets sont en lien avec l'engorgement, et/ou la salinité du sol, et/ou la baisse de la fertilité et la compaction des sols (cf. Chap 5 § 5.3.1). D'une part, les résultats ont montré que la salinité du sol diminue sensiblement quand la fréquence et la quantité de sable apporté sont importantes (Chap 6 § 6.3.2.1). D'autre part, les agriculteurs parlent de « favoriser le développement de nouvelles racines » dans un environnement relativement meuble et aéré et de la précocité de maturation des fruits. Ce qui justifie parfois des apports massifs et fréquents sans labour car un « labour annuel abîme les racines du palmier et ainsi l'affaiblit ». Cette confrontation permet de valider la forme de la courbe observée (Chap 6, Fig. 6.11)

Toutefois, la pratique des amendements sableux s'avère plus complexe qu'un simple apport de sable 'inerte'. En effet, c'est l'occasion du travail du sol qui consiste en un grand labour pour remeubler la couche superficielle du sol, puis le mélange de cette couche avec du sable et du fumier apportés et enfin l'arrachage des mauvaises herbes. En plus, le sol de l'oasis de Fatnassa semble particulièrement sensible à des phénomènes de compaction, de dégradation du statut organique et minéral et à la salinisation. Ces phénomènes se conjuguent sans qu'il soit vraiment possible de vérifier la prédominance d'un des facteurs, faute d'étude spécifique. La fertilité et la compaction des sols semblent particulièrement affectées dans les sols les plus âgés et se traduisent par l'abandon des parcelles situées au cœur de l'oasis. Elles conduiraient à une réduction de la vigueur végétative et des rendements des palmiers avec des effets sur le développement du système racinaire et la précocité clairement exprimés par les agriculteurs. Ces hypothèses peuvent être justifiées par la concentration des palmeraies abandonnées et celles à conduite de survie dans la partie la plus ancienne de l'oasis (Fig. 2.5 et Fig. 6.2). Des travaux

récents dans la région du Nefzaoua confirment ces constats et montrent une amélioration de 17% de la densité apparente des sols amendés par rapport à des sols non amendés, et une amélioration de 20% du rendement de la même parcelle avant et après amendement (Mtimet, 2009). Les amendements sableux associés au travail du sol améliorent donc la porosité du sol et favorisent ainsi la bonne infiltration de l'eau dans le sol. De plus, l'apport d'une couche de 10 à 30 cm de sable est susceptible de 'diluer' la salinité de la couche superficielle du sol existant, d'où la diminution de la conductivité électrique observée en fonction de la quantité et de la fréquence des apports de sable. En plus, les apports de fumier améliorent le potentiel organique et la fertilité des sols.

Nous avons mis en évidence l'effet de la pratique de travail du sol sur l'amélioration des potentiels surtout quantitatif de production des dattes. Toutefois, les agriculteurs ne sont pas tous en mesure de supporter la charge supplémentaire occasionnée par la pratique des amendements et même si la majorité le pratique, seulement une minorité le fait fréquemment et/ou avec des quantités importantes. Les disparités sont de nouveau observées, les agriculteurs ayants des revenus extra-agricoles arrivent à intensifier et donc à améliorer le potentiel de production de dattes de bonnes qualités, alors que d'autres limitent les interventions au strict minimum.

Une nappe salée superficielle dégrade la qualité des dattes, amont vs. aval. La position superficielle de la nappe paraît plus déterminante de la qualité des dattes que de la quantité produite. Les résultats ont montré que la position superficielle de la nappe à elle seule limite de 20% le potentiel de production de dattes branchées en occasionnant la production de dattes de moins bonne qualité.

Une position superficielle de la nappe a tendance à limiter la durée d'irrigation (cf. Chap. 5 § 5.3.4) mais aussi à favoriser l'augmentation de la salinité de la nappe et en retour celle du sol (cf. Chap. 6 § 6.3.2.2 et § 6.3.2.1). Cet ensemble en interaction limite ainsi la capacité de production des dattiers ayant 'les pieds dans l'eau' où plus que 70% des racines sont généralement situées dans l'horizon de 120 cm (Munier, 1973 ; Abou-Khaled et al., 1981). Les agriculteurs qualifient cette eau superficielle d'une « eau morte » et expriment clairement l'effet de l'engorgement sur la performance du palmier dattier même s'ils n'en appréhendent pas tous les processus de dégradation de la qualité du sol (cf. Chap. 3 § 3.5.1). Ils déclarent aussi irriguer plus fréquemment surtout en hiver « les eaux vivantes chassent les eaux mortes ». Toutefois les résultats ont montré qu'il n'y a pas une relation significative entre la fréquence des irrigations hivernales et la profondeur de la nappe. Quant à l'étude de l'interaction de la profondeur de la

nappe avec la fréquence des irrigations estivales, elle a montré que les agriculteurs irriguent moins fréquemment en été là où la nappe est très superficielle. Ces résultats confirment que les agriculteurs ont conscience du rôle que joue la nappe dans l'atténuation du stress hydrique.

Au-delà d'images statiques de la profondeur et de la salinité de la nappe, leur distribution spatiale reflète un dysfonctionnement du drainage à l'aval et une redistribution récurrente amont/aval des sels (cf. Chap 4 § Fig. 4.5 et Fig. 4.6). La salinité de la nappe paraît ainsi comme une conséquence directe de sa profondeur. Une amélioration de la performance d'évacuation des eaux de drainage s'impose donc pour rabattre la nappe mais aussi pour évacuer les sels accumulés vers l'aval.

Malgré qu'une position profonde favorise à la fois une nappe moins salée et un sol moins salé (Fig. 6.5 et Fig. 6.6), les résultats ont mis en évidence qu'une position très profonde de la nappe dégrade elle aussi la qualité des dattes produites. Vu la faible fréquence des irrigations dans l'oasis de Fatnassa, une profondeur optimum en saison hivernale (entre 0.75 à 1.10 m) pourrait être favorable au bon développement du palmier dattier ce qui permettrait en quelque sorte de combler le déficit hydrique. Les résultats issus des travaux d'Ayars et al., (1999) corroborent cette hypothèse et montrent le rôle considérable de la nappe phréatique, malgré qu'elle soit salée, à combler les besoins en eau des cultures (le coton).

Mode de conduite des palmeraies. L'observation de la conduite des palmeraies à l'échelle de l'oasis montre une forte variabilité et une structuration spatiale. En plus de l'âge du palmier dattier, plusieurs facteurs environnementaux et socio-économiques influencent la conduite des palmeraies. Il s'agit notamment de la salinité du sol, de la position sub-affleurante de la nappe, du degré d'intensification (fréquence de travail du sol, entretien du système d'irrigation, entretien des pieds de palmier dattier). De même, la rente d'émigration vers la France a un rôle considérable dans l'intensification des exploitations existantes mais aussi dans la création de nouvelles plantations.

En plus de la stratégie d'abandon complet des palmeraies (10.5% de la surface totale actuelle), l'indice de conduite de palmeraie distingue trois différentes stratégies : intensive, extensive et de survie. Les stratégies d'intensification et d'extension sont souvent indissociables, mais aussi reliées à la disponibilité des revenus externes et à l'appartenance lignagère et spatiale dans l'oasis (cf. Chap 2 § 2.2.6). De plus, les résultats ont montré que l'irrigation à elle seule ne garantit pas la bonne qualité des fruits. Ces palmeraies à conduite de survie sont généralement situées soit au

cœur de l'oasis et ainsi sujettes au vieillissement du palmier dattier et l'appauvrissement du sol, soit dans les zones caractérisées par une nappe salée et/ou superficielle. Quant aux palmeraies jeunes, la perte du potentiel de production de dattes ne pourrait pas seulement être expliquée par l'âge des palmiers dattiers. Ces extensions sont généralement localisées vers l'aval dans les zones de topographie basse et limitrophe du Chott et où la nappe est très superficielle et très salée par rapport à l'amont. D'autre part, l'analyse du potentiel de production en fonction de la densité de plantation a mis en évidence l'intérêt de respecter une certaine densité de plantation pour favoriser la production de dattes branchées, ainsi les optimums absolus quantitatifs et qualitatifs ont été observés pour une densité de 150 à 200 pieds.ha⁻¹. Nous supposons ainsi que dans les plantations denses ou encore clairsemées, les performances des pieds Deglet Nour pourraient être dégradées sous l'influence de deux processus contradictoires de dégradation des fruits : un environnement de concurrence pour l'eau et les éléments nutritifs et le microclimat oasien. D'une part, la méthode ancestrale consiste à planter les palmiers serrés les uns contre les autres et en plaçant des arbres fruitiers à grand feuillage (figuier, pêchers, abricotiers, grenadiers, ...) entre celles-ci, permettant ainsi un ombrage suffisant pour que la terre garde son humidité pendant plusieurs jours même en plein été. Toutefois, quand les plantations deviennent trop denses -au-delà de 400 pieds.ha⁻¹-, un environnement de concurrence prédomine le microclimat bien connu dans les plantations ancestrales et dégrade ainsi la qualité des dattes -petit calibre-. D'autre part, des plantations clairsemées ont l'avantage de permettre la production des dattes de grand calibre (faible concurrence). Toutefois, quand la densité devient trop faible -moins de 100 pieds.ha⁻¹- la terre entre les palmiers reste à nu ce qui favorise une évaporation rapide dégradant ainsi le microclimat oasien et en l'occurrence la quantité des fruits produits tant bien que leur qualité.

Le mode de conduite des palmeraies soulève à nouveau les deux principales questions de survie de l'activité oasienne : la disparité entre les agriculteurs et la durabilité. Premièrement, les agriculteurs ayant les moyens financiers (grande exploitation et disponibilité de revenus externes) investissent dans l'entretien des parcelles (labour, amendement, entretien du palmier,...), dans les nouvelles plantations et même dans la création de nouveaux forages 'illicites', dans ces cas l'activité oasienne prend une fonction productive. Par contre d'autres pratiquant des irrigations plus ou moins régulières, ne pouvant pas supporter ces charges, ni le coût du travail manuel occasionné, sont amenés à ne plus faire certains travaux ou alors à les faire moins fréquemment. Il a été noté dans le chapitre précédent (cf. Chap. 5) que ce type de conduite occasionne un fort dépassement de la règle collective d'irrigation suite à la mauvaise qualité d'entretien du système d'irrigation. Ces petits agriculteurs sont ainsi moins performants toutefois ils s'attachent à

l'activité oasienne qui prend plus une dimension identitaire et patrimoniale. Deuxièmement, les extensions perturbent fortement le tour d'eau et les conséquences sur la fréquence des irrigations sont très marquées notamment sur l'antenne 2. Face aux défis environnementaux complexes de la viabilité de la ressource en eau et en terre, l'augmentation de la capacité du réseau d'irrigation pour améliorer la fréquence du tour d'eau ou au contraire son maintien à la capacité actuelle paraît un choix difficile. D'une part, la ressource en eau est rare mais aussi le risque de salinisation des eaux suite à la surexploitation et/ou à la contamination par des aquifères supérieurs plus salés (Mamou & Hlaimi, 1999 ; Hamdane, 2007 ; Zammouri et al., 2007) et d'autre part le risque de salinisation des terres (Marlet et al., 2009) menacent l'équilibre aussi fragile des oasis. Reconnaître et prendre en compte la diversité des exploitations agricoles paraît un défi essentiel pour préserver les ressources en eaux et en sol et pour assurer la survie d'une agriculture oasienne millénaire.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les oasis du sud tunisien sont des petits périmètres irrigués établis depuis plusieurs siècles sur des ressources en eau souterraines très peu renouvelables. Jadis, caractérisées par un savoir-faire en hydraulique agricole et une maîtrise de la gestion collective des ressources en eau et en terre, elles étaient, depuis le 19^{ème} siècle, le théâtre de transformations socio-économiques qui ont fragilisé ce mode d'organisation ancestrale. Les améliorations techniques mises en place n'ont pas atteint leurs objectifs et un décalage entre les performances réelles et celles prévues persiste. Ces milieux oasiens sont actuellement soumis à de forte pression anthropique, climatique, environnementale, agronomique et sociale, et représentent des situations spécifiques qui n'ont fait l'objet jusqu'à présent que d'un nombre très limité d'études en regard de celles consacrées aux grands périmètres irrigués classiques.

Pour une meilleure gestion de ces systèmes irrigués collectifs, et dans l'optique d'une amélioration de la productivité des ressources utilisées, l'étude de leur fonctionnement et la détermination holistique des facteurs effectifs qui impactent leurs performances, méritent d'être approfondies. Le présent travail de thèse a été ainsi centré sur les déterminants des performances d'une oasis avec des aménagements hydro-agricoles associés où les pratiques agricoles influencent les caractéristiques du milieu physique et sont elles-mêmes raisonnées en partie en fonction de ces caractéristiques. Il s'agit d'établir une méthodologie d'analyse du fonctionnement et d'évaluation multicritère des performances du périmètre irrigué collectif. Le contexte est marqué par des dysfonctionnements de la gestion de l'irrigation liés aux pratiques et comportements individuels face à une gestion collective de l'aménagement mais aussi par la complexité des interactions des contraintes environnementales (salinité et engorgement) et par la diversité des pratiques et des stratégies des agriculteurs.

Dans ce contexte, nous avons mis en place deux étapes complémentaires. D'abord, les contraintes, leur perception par les agriculteurs et les pratiques mises en place pour y faire face ont été caractérisées. Et ensuite, les performances de l'irrigation et des palmiers dattier ont été évaluées. Les conclusions portent donc sur : (i) l'analyse 'qualitative' du fonctionnement en se basant sur la confrontation du vision de l'ingénieur aux discours et aux pratiques des agriculteurs ; (ii) l'évaluation 'quantitative' des performances individuelle et collective de l'irrigation et des performances des palmeraies ; (iii) la confrontation des deux démarches qualitative et quantitative d'analyse et d'évaluation (vi) la validité et les limites de l'approche suivie ; et (v) les perspectives proposées pour cette recherche.

Analyse du diagnostic de l'ingénieur et du discours, des pratiques et de la perception des contraintes par les agriculteurs

À l'inverse d'une démarche expérimentale purement technique ou de celle non expérimentale purement participative, la démarche de confrontation d'une part du diagnostic d'ingénieur à la perception des agriculteurs et d'autre part du discours des agriculteurs à leurs pratiques vise une identification holistique des contraintes et de leur relation de causalité. L'analyse nous a permis de mettre en évidence les avantages, les limites et les synergies de la représentation du programme de modernisation mis en œuvre par l'ingénieur confrontée à la représentation des agriculteurs. En ultime conclusion pour cette analyse, nous notons que :

- les projets de développement ont apporté des solutions techniques mais aussi de nouveaux problèmes d'organisation dans la mesure où ils ont favorisé des stratégies individuelles en contradiction avec les modalités traditionnelles de gestion des oasis. Cette nouvelle situation, nous conduit à poser la question du devenir des petites exploitations majoritaire où les 2/3 des exploitations ont une taille inférieure à 0.5 ha. Ces exploitations ont une fonction identitaire et permettent de fixer sur place un certain nombre de familles. Toutefois, elles contribuent fortement à l'allongement du tour d'eau, et les faibles performances du palmier dattier.
- les agriculteurs gèrent les contraintes de leur environnement malgré qu'ils n'appréhendent pas tous les processus surtout en relation avec la dégradation du sol mais en contre partie ils accentuent les déficiences des règles collectives suite à des comportements individuels accentués par les interventions techniques.
- un grand décalage entre le diagnostic de l'ingénieur et de la perception et des pratiques des agriculteurs persiste.

Une perception homogénéisée des facteurs qui entravent la valorisation des ressources utilisées, est ainsi nécessaire entre décideurs et acteurs locaux afin de spécifier les priorités d'interventions et de garantir leur acceptation par les acteurs locaux.

Evaluation des performances individuelle et collective de l'irrigation et des performances des palmeraies

Cette démarche expérimentale vise la validation des hypothèses sur les relations de causalité dégagées lors de la phase d'analyse-diagnostic afin de discuter d'éventuelles recommandations pour améliorer les performances des systèmes collectifs irrigués. Elle a été basée sur la mesure physique des pratiques des agriculteurs (adaptation), des performances des systèmes de culture

(effet), et plus globalement de la durabilité des aménagements hydro agricoles (impact). L'évaluation des performances individuelle et collective de l'irrigation et des performances des palmeraies, montre que le système de production dans cet écosystème est confronté à certains nombres de contraintes qui remettent en question sa durabilité. Ces contraintes sont essentiellement liées à la gestion des ressources en eau et en sol mais aussi aux contraintes environnementales et aux aspects socio-économiques. Les principales conclusions tirées de ce travail d'évaluation et qui sont valables dans la majorité des oasis du sud tunisien sont les suivantes :

- les palmeraies sont caractérisées par la faible diversité des variétés de palmier dattier. L'incitation économique a favorisé la monoculture de la variété Deglet Nour destinée principalement à l'export aux dépens des variétés traditionnelles plus productives mais actuellement menacées d'extinction.
- malgré la rareté de la ressource en eau dans un milieu désertique, les oasis étaient jadis reconnues pour le respect des règles ancestrales permettant une régularité de l'irrigation et une diversification des variétés de palmiers dattiers et des cultures des deux étages sous-jacents. Elles sont aujourd'hui sujettes à un allongement excessif du tour d'eau, surtout en période estivale, passant de 15 jours aux années 70 à plus de 60 jours de nos jours.
- les principales causes de la faible fréquence du tour d'eau sont les pratiques individuelles qualifiées « d'inefficientes » à savoir : un faible entretien du système d'irrigation, des irrigations nocturnes laissées sans surveillance, un faible degré d'implication surtout des propriétaires des palmeraies de petites surfaces, mais aussi la stratégie d'extension dans la continuité des anciennes plantations ; s'ajoute à ces pratiques et stratégies individuelles les dysfonctionnements techniques du réseau d'irrigation.
- les principales causes de la faible performance des pieds Deglet Nour sont la durée d'irrigation annuelle, la fréquence des irrigations hivernales, la fréquence des irrigations estivales, la salinité du sol, la fréquence des amendements sableux, l'engorgement en interaction mais aussi le type de palmeraie et la densité de plantation. Nous avons aussi mis en évidence que par rapport à la durée d'irrigation annuelle, et donc la dose, les fréquences des irrigations estivales et hivernales semblent être les facteurs les plus déterminants de la performance du palmier dattier.
- le dysfonctionnement du système de drainage surtout vers l'aval de l'oasis où la topographie ne favorise pas l'évacuation des eaux de drainage vers l'exutoire favorise l'augmentation de la salinité des sols. La salinité du sol a un effet déterminant sur la

quantité et la qualité des dattes, tandis que l'engorgement occasionne la diminution de la capacité du palmier dattier à produire des dattes de bonne qualité.

- le morcellement accru des parcelles au centre de l'aménagement, accompagné par le vieillissement du palmier dattier et l'appauvrissement du sol, crée des disparités qui menacent la durabilité de ce système irrigué collectif. Les agriculteurs ayant les moyens et appartenant à des groupes familiaux dominants cherchent à étendre en continue leurs plantations, ce qui occasionne un dépassement de la règle collective et une situation d'inégalité entre les agriculteurs.
- conduite de palmeraie vs. durabilité iniquité : la stratégie de survie (se limiter à des irrigations plus ou moins régulières) relève la question d'efficacité dans la mesure où elle perturbe le fonctionnement du système et l'application des règles de gestion ; toutefois, elle a une fonction identitaire. La stratégie d'extension quant à elle relève deux questions : l'iniquité entre les agriculteurs et la durabilité du système oasien.

Ainsi, la survie de l'activité oasienne millénaire est aujourd'hui fortement conditionnée par l'utilisation rationnelle des ressources en eau et en sol. La politique actuellement entreprise par les autorités publiques dans l'économie et la valorisation des ressources en eau et en sol, doivent aller au-delà des solutions techniques, s'imprégner des perceptions des agriculteurs et respecter la dimension historique de la gestion de l'irrigation.

Cette évaluation a mis en évidence que la valorisation des ressources en sol et eau, et les performances d'un système irrigué collectif sont ainsi des concepts complexes. Au-delà de la simple dimension technique de mobilisation et d'application de l'eau d'irrigation sur un sol cultivable, les aspects socioéconomiques (lignages et droits ancestraux, gestion de l'eau et des terres) sont des facteurs déterminants des performances environnementales et agronomiques des systèmes irrigués collectifs.

Confrontation de la démarche d'analyse-diagnostic et d'évaluation des performances hydraulique et agronomique

L'emploi d'une approche à regard croisé entre différentes disciplines avait pour finalité de valider les résultats d'une démarche d'analyse-diagnostic basée sur la perception des agriculteurs et la vision de l'ingénieur en vue de l'identification des contraintes et de leur relation de causalité à une démarche d'évaluation de la performance de l'irrigation et les performances agronomiques des palmeraies basée sur un protocole expérimental de validation. Elle montre que pour réussir les plans de développement, il faut un changement de posture des *approches normatives*

classiques et des approches participatives dans le domaine des aménagements hydro-agricoles dans la détermination des priorités d'intervention mais aussi dans la mise en œuvre d'interventions adaptées. Il faut à la fois aller au-delà des modèles techniques applicables à tout système irrigué, mais aussi aller au-delà du simple discours de l'agriculteur pour comprendre sa logique d'action et ses pratiques qui témoignent généralement de sa capacité à gérer les contraintes de son environnement malgré qu'il n'en appréhende pas certains processus. Il s'agit ainsi de comprendre les spécificités locales et le contexte social et historique mais aussi la logique d'action des agriculteurs pour en adapter les changements techniques projetés. Ce travail s'inscrit ainsi dans une démarche de recherche-action qui tente de spécifier *in fine* les priorités d'intervention et d'accompagnement des agriculteurs.

En conclusion, cette confrontation nous a permis d'avancer deux principales recommandations pour améliorer la gestion des systèmes irrigués : pour identifier les facteurs de dysfonctionnements et les déterminants effectifs des faibles performances d'un système irrigué, '*une analyse critique qualitative*' du discours et des pratiques des agriculteurs peut être suffisante et sa confrontation avec la vision d'ingénieur, si elle existe, peut être un plus ; et pour entreprendre des plans d'action, une '*évaluation quantitative*' s'impose en prenant en compte les spécificités locales et le contexte social et historique pour en adapter les changements techniques projetés, et donc en s'appuyant sur '*une analyse critique qualitative*'.

Validité et limites de l'approche

Nous avons développé une approche qui a comme particularité de resituer les dimensions du fonctionnement du périmètre collectif irrigué dans un contexte disciplinaire particulier qui consiste en un regard croisé entre différentes approches mono-disciplinaires et complémentaires faisant appel à l'hydraulique, l'agronomie et les sciences sociales, et où les perceptions, les pratiques et les stratégies des agriculteurs occupent une place importante dans notre démarche d'analyse du fonctionnement et d'évaluation des performances hydrauliques et agronomiques. Pour appréhender la complexité des relations au sein de ce système, l'approche suivie nous a permis de simplifier la diversité des situations abordées tout en mettant l'accent sur la cohérence d'ensemble. Elle comprend deux niveaux d'analyse. Une première analyse d'ensemble basée sur les connaissances et le discours des acteurs de la gestion du système irrigué nous a conduits à l'identification des principales contraintes et leur relation de causalité. Un deuxième niveau d'analyse fondé sur des mesures, des enquêtes et des observations spatialisées nous a permis d'évaluer les performances de l'irrigation et des palmeraies au niveau de la parcelle et de l'oasis.

La passerelle entre les deux niveaux d'analyse est fondée sur une représentation du fonctionnement du système permettant d'organiser et de relier les différentes composantes. Ceci a été rendu possible grâce à la formalisation opérationnelle des relations entre la parcelle et son environnement (sol, nappe, irrigation, paysan et culture). L'analyse au niveau de la parcelle nous a permis d'identifier, en plus des pratiques et stratégies individuelles inefficaces, d'autres pratiques d'adaptation des agriculteurs aux différentes contraintes dans une optique de compréhension de leur logique d'action. Cette démarche pourrait contribuer à éclairer les décideurs pour la mise en œuvre des programmes de développement et à assurer l'acceptation par les agriculteurs des choix d'interventions techniques. Elle présente néanmoins, certaines limites, qu'il est bon de mentionner, afin d'apporter des améliorations et pour s'inscrire dans des travaux de recherches futurs.

La principale limitation d'une démarche d'analyse diagnostic basée sur l'ingénierie et la perception d'agriculteurs est qu'elle reste qualitative et synthétique. L'évaluation réalisée à partir de mesures, d'enquêtes et d'observations nous a permis de dépasser cette limitation, de conforter les premiers résultats obtenus à une démarche objective de diagnostic. Toutefois, nous nous sommes confrontés à la difficulté d'hierarchisation limitant les performances quantitatives et qualitatives du palmier dattier. Il convient aussi de s'interroger sur la généralité de notre démarche et sa portée en dehors du cadre d'analyse des oasis du Nefzaoua. Cette approche holistique à regards croisés entre approche *normative des performances* et *approche participative ou analyse subjective fondée sur le discours et la perception* nécessite donc d'être explorée dans d'autres systèmes collectifs afin de spécifier les priorités d'intervention dans une démarche de développement et d'accompagnement des agriculteurs. Cette démarche d'associer l'agriculteur à la réflexion et d'analyse critique et objective de ses pratiques nous semble nécessaire afin de garantir la réussite des plans d'actions. Notre démarche répond à plusieurs critères dont l'opérationnalité se traduisant par les liens de causalités exprimés au niveau de l'arbre à problèmes ; la fonctionnalité se traduisant par la conceptualisation du fonctionnement et la mise en place de la base de données et du système d'information géographique, et la finalité dans la mise en place de supports opérationnels simples et faciles à comprendre par les agriculteurs dans la mise en place des plans d'action.

Perspectives

Les investigations menées dans ce travail de recherche constituent une première contribution à la compréhension des milieux oasiens complexes, elles devront être complétées par des actions de

recherches tant sur le plan expérimental que sur la démarche méthodologique pour mieux analyser et comprendre ces milieux mais plus largement les systèmes irrigués collectifs. Parmi ces actions nous pouvons citer les suivantes :

- le diagnostic et l'évaluation des performances de l'oasis ont été établis sur une 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 fournir des éléments pour l'étude de la dynamique d'évolution.
- il serait intéressant d'hierarchiser les indicateurs choisis et de les corrélérer avec des indicateurs socioéconomiques pour l'évaluation des performances de ce système complexe. Il serait également important d'évaluer leur impact réel en terme de durabilité et de pouvoir tester des scénarios d'évolution de ces systèmes et apporter des réponses aux acteurs de la gestion de l'eau.
- sans abandonner l'approche simple, des améliorations en terme d'approche d'analyse des systèmes oasiens sont souhaitables. Une modélisation du fonctionnement des ces milieux est nécessaire.
- pour plus de pertinence dans les réponses aux besoins de développement dans chaque situation, il faudrait multiplier les approches expérimentales pour englober le maximum de zones et aboutir à une connaissance plus affinée de la situation agro-socio-économique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdul Quium A.S.M. & Moon J.R. (2003). *A guide to the application of public participation in planning and policy formulation towards sustainable transport development*. United Nations, New York, 55 p.
- Abernethy C.L. (1989). Performance criteria for irrigation systems. In *Proceedings on International Conference on Irrigation Theory and Practice*, Rydzewski J.R. & Ward K. (eds.), University of Southampton: UK, 12-15 September 1989.
- Abou-Khaled A., Chaudhri S.A. & Abdul-Salam S. (1981). Consumption of water by date palms: preliminary results of a date palm irrigation experiment in central Iraq. *Date Palm Journal* **1**: 131-132.
- 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.
- Al Khayri J.M. (2002). Growth, proline accumulation and ion content in sodium chloride-stressed callus of date palm. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant* **38**: 79-82.
- Al-Ajmi A., Nortcliff S. & Simmonds L.P. (2002). IMAGE: a physically-based one dimensional irrigation management model for soil salinity control. *Soil Use and Management* **18**: 184-190.
- Ali A.M.S. (2003). Farmers' knowledge of soils and the sustainability of agriculture in a saline water ecosystem in Southwestern Bangladesh. *Geoderma* **111**: 333-353.
- Al-Saikhan M.S. (2008). Effect of thinning practices on fruit yield and quality of Ruzeiz date palm cultivar (*Phoenix dactylifera* L.) in Al-Ahsa Saudi Arabia. *Asian Journal of Plant Sciences* **7**: 105-108.
- Alva A.K. & Bille S.W. (1981). Diagnostic techniques for cereals based on plant analysis. II. Diagnosis and yield prognosis model. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **12**: 1227-1248.
- Aubriot O. (2004). *L'eau, miroir d'une société. Irrigation paysanne au Népal central*. Paris, Éditions du CNRS, 321 p.
- Aubriot O. (2000). Comment « lire » un système d'irrigation ? Une approche pour l'étude des systèmes irrigués traditionnels, illustrée de cas pris au Népal. Université catholique de Louvain, **Document de Travail n° 8**, 21 p.
- Audibert L. (2006). *UML 2.0. Cours. Institut Universitaire de Technologie de Villetaneuse*. Département Informatique, Villetaneuse, France [online] URL <http://www-lipn.univ-paris13.fr/audibert/pages/enseignement/cours.htm>
- Ayars J.E., Hutmacher R.B., Schoneman R.A., Soppe R.W.O., Vail S.S. & Dale F. (1999). Realizing the potential of integrated irrigation and drainage water management for meeting crop water requirements in semi-arid and arid areas. *Irrigation and Drainage Systems* **13**: 321-347.
- Ayers R.S. & Westcot D.W. (1985). *Water quality for agriculture. Irrigation and drainage paper*. FAO, Rome, 180 p.
- Baduel A. & Baduel P. (1980). Le pouvoir de l'eau dans le Sud-Tunisien. *Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée* **30**: 101-134.

- Barreteau O. (1998). *Un Système Multi-Agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et modes d'organisation*. PhD de l'ENGREF, 262 p.
- Battesti V. (2005). *Jardins au désert. Evolution des pratiques et savoir oasiens. Jérid tunisien*. Collection A travers champs, IRD, Paris, France, 440 p.
- Beccar L., Boelens R. & Hoogendam P. (2002). Water rights and collective action in community irrigation. **In** Boelens R. & Hoogendam P. (Eds) *Water rights and empowerment*, 268 p.
- Bédoucha G. (1987). *L'Eau, l'amie du puissant. Une communauté oasienne au Sud-tunisien*. Edition des archives contemporaines, CNRS et CNL, Paris, 427 pp.
- Bekele W. & Drake L. (2003). Soil and water conservation decision behavior of subsistence farmers in the Eastern Highlands of Ethiopia: a case study of the Hunde-Lafto area. *Ecological Economics* **46**: 437-451.
- Belhedi A. (1998). Stratégies et contre-stratégies aux prises des problèmes de développement à Souk Lahad (Nefzaoua). **In** *Les oasis au Maghreb, Mise en valeur et développement, Cahiers du CERES, Série Géographique*, **12** : 229-246.
- Ben Aissa I. (2006). *Evaluation de la performance d'un réseau de drainage enterré au sein d'une oasis modernisée du sud tunisien : Cas de l'oasis de Fatnassa-Nord à Kébili (Tunisie)*. Master Recherche en Eau et Environnement, Université de Montpellier II, Montpellier, France, 119 p.
- Ben Aissa I., Bouksila F., Bahri A., Bouarfa S., Chaumont C. & Hichri W. (2004). Gestion de l'eau et des sels au sein d'une oasis du Sud tunisien. **In** Hammani A., Kuper M. & Debbarh A. (Eds) *Modernisation de l'Agriculture Irriguée*, 19 au 23 avril 2004, Rabat, Maroc.
- Bernstein L. (1981). Effects of salinity and water regime on crop yields. **In** Yaron D. (ed) *Salinity in irrigation and water resources*; Marcel Dekker, INC, USA, pp. 47-64.
- Blackstock K.L., Kelly G.J. & Horsey B.L. (2007). Developing and applying a framework to evaluate participatory research for sustainability. *Ecological Economics* **60**: 726-742.
- Boesen J. & Friis-Hansen E. (2001). Soil Fertility Management in Semi-Arid Agriculture in Tanzania: Farmers' Perceptions and Management Practices. Centre for Development Research, Copenhagen, **CDR Working Paper 01.10**, 34 p.
- Bon E. (2001). Systèmes d'irrigation par gravitation du nord de l'Inde : le rôle du capital social dans la gestion locale des ressources communes. *Tiers-Monde* **42**: 333-351.
- Bos M.G., Molden D. & Burton M. (2001). *Guidelines for irrigation and drainage performance assessment*. ICID.CIID.
- Bos M.G., Murray-Rust D., Merry D., Johnson H. & Snellen W. (1994). Methodologies for assessing performance of irrigation and drainage management. *Irrigation and Drainage Systems* **7**: 231-261.
- Bos M.G. & Nugteren J. (1990). *On irrigation efficiencies*. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) **Publication 19**, Wageningen, The Netherlands, 4th edition, 120 p.
- Bou Ali S. (1990). L'homme et l'oasis : démographie, migrations, emploi dans les systèmes oasiens, étude de cas dans le Jérid et le Nefzaoua. *Options Méditerranéennes, Série A. Séminaires méditerranéens* **11** : 277-288.
- Bouarfa S., Marlet S., Douaoui A., Hartani T., Mekki I., Ghazouani W., Benaïssa I., Vincent B., Hassani F. & Kuper M. (2009). Salinity patterns in irrigation systems, a threat to be

- demystified, a constraint to be managed: field evidence from Algeria and Tunisia. *Irrigation and Drainage* **58**: S273-S284.
- Bouwer H. (1969). Salt balance, irrigation efficiency and drainage design. *Journal of Irrigation and Drainage Division* **95**: 153-170.
- Brewer J.D., Sakthivadivel R. & Raju K.V. (1997). Water distribution rules and water distribution performance: A case study in the Tambraparani Irrigation System. Research Report 12. IIMI, Colombo, Sri Lanka, 43p.
- BRL Ingénierie & STUDI. (1999). *Projet d'amélioration des périmètres irrigués dans les oasis du Sud*. DG/GREE, MARH: Tunis.
- Brochier-Puig J. (2004). Société locale et Etat face aux limites de la ressource eau (Nefzaoua, sud-ouest tunisien). In Picouet M., Sghaier M., Genin D., Abaab A., Guillaume H., & Elloumi M. (Eds) *Environnement et sociétés rurales en mutation : approches alternatives* IRD, Paris, France, Latitudes 23, pp.307-321.
- Brochier-Puig J. (2000). Modes d'organisations et modalités d'accès à l'eau dans les périmètres irrigués privés (sur forages illicites) : Cas des anciens nomades sédentarisés à El Faouar (Nefzaoua, Tunisie). In Rivière-Honegger A. & Ruf T. (Eds) *Approches sociales de l'irrigation et de la gestion collective de l'eau. Démarches et expériences en France et dans le monde, Territoires en Mutation* **7**: 203-218.
- Bromley D.J. (1991). *Environment and economy: Property rights and public policy*. Blackwell, Cambridge, MA and Oxford, U.K., 247p.
- Burt C., Clemmens A.J., Strelkoff T., Solomon K., Bliesner R., Hardy L., Howell T., Members, ASCE & Eisenhauer D. (1997). Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **123(6)**: 423-442.
- Burton M., Molden D. & Skutsch J. (2000). *Benchmarking irrigation and drainage system performance*. Position paper. FAO, Rome, Italy, 28p.
- Cai X., McKinney D.C. & Rosegrant M.W. (2003). Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region. *Agricultural Systems* **76**: 1043-1066.
- 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.
- Centre National d'Etudes Agricoles (CNEA), Agri Business Consultants & Electrowatt Ing. Conseils (1987). *Projet de rénovation et de création d'oasis dans la Nefzaoua. Oasis de Fatnassa 1, Fatnassa 2 et Bechri*. Projet d'exécution, 12 p.
- Centre National d'Etudes Agricoles (CNEA), Agri Business Consultants & Electrowatt Ing. Conseils (1984) *Projet de rénovation et de création d'oasis dans la Nefzaoua. Oasis de Fatnassa 1, Fatnassa 2, Bechri et Zaouiet el Anez*. Avant projet, 45 p.
- CGIAR (2006). Challenge Program on Water and Food. Medium Term Plan 2007-2009. Colombo, Sri Lanka, 26 p.
- Chambers R. (1994). The origins and practice of Participatory Rural Appraisal. *World Development* **22**: 953-969.
- Christen E.W., Ayars J.E. & Hornbuckle J.W. (2001). Subsurface drainage design and management in irrigated areas of Australia. *Irrigation Science* **21**: 35-43.
- Clément R. (1966). Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande. *La Houille Blanche* **5**: 553-575.

- Clemmens A.J., Dedrick A.R., Clyma W. & Ware R.E. (2000). On-farm system performance in the Maricopa-Stanfield Irrigation and Drainage District area. *Irrigation and Drainage Systems* **14**: 93-120.
- Clouet Y. & Dollé V. (1998). Aridité, oasis et petite production, exigences hydrauliques et fragilité sociale : une approche par analyse spatiale et socio-économique. *Sécheresse* **9**: 83-94.
- D'Urso G., Menenti M. & Santini A. (1996). *Remote sensing and simulation modelling for on-demand irrigation systems management*. In Irrigation Scheduling: From Theory to Practice - Proceedings. Water Reports 8, FAO, Rome, Italy.
- Datta K.K. & de Jong C. (2002). Adverse effect of waterlogging and soil salinity on crop and land productivity in northwest region of Haryana, India. *Agricultural Water Management* **57**: 223-238.
- Datta K.K., Sharma V.P. & Sharma D.P. (1998). Estimation of a production function for wheat under saline conditions. *Agricultural Water Management* **36**: 85-94.
- Dedrick A.R., Bautista E., Clyma W., Levine D.B., Rish S.A. & Clemmens A.J. (2000). Diagnostic analysis of the Maricopa-Stanfield Irrigation and Drainage District area. *Irrigation and Drainage Systems* **14**: 41-67.
- Desbiez A., Matthews R., Tripathi B. & Ellis-Jones J. (2004). Perceptions and assessment of soil fertility by farmers in the mid-hills of Nepal. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **103**: 191-206.
- Diederer P., Meijl H.V., Wolters A. & Bijak K. (2003). Innovation Adoption in Agriculture: Innovators, Early Adopters and Laggards. *Cahiers d'économie et sociologie rurales* **67**: 30-50.
- Djili K., Daoud Y., Gaouar A. & Beldjoudi Z. (2003). La salinisation secondaire des sols au Sahara. Conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Science et changements planétaires / Sécheresse* **14**: 241-246.
- Douthwaite B., Alvarez S., Cook S., Davies R., George P., Howell J., Mackay R. & Rubiano J. (2007). Participatory impact pathways analysis: A practical application of program theory in research for development. *The Canadian Journal of Program Evaluation* **22**: 127-159.
- El Fahem T., Siegfried T., Kinzelbach W., Pfeiffer S. & Ben Baccar B. (2004). Isotopic and hydrochemical investigation in the origins of groundwater salinization in the Nefzawa Oases (Southern Tunisia). In International Conference on Soil and Groundwater Contamination – Risk Assessment and Remedial Measures, Hyderabad, India, 9 p.
- El Fekih M. & Pouget M. (1966). Les sols des oasis anciennes du sud tunisien. Conférences sur les sols méditerranéen, 12-17 septembre 1966, Madrid, Espagne, 12 p.
- Ennabli N. (1993). *Les aménagements hydrauliques et hydroagricoles en Tunisie*. INAT-DGREF, Tunis.
- Evanylo G.K. & Sumner M.E. (1987). Utilization of the boundary line approach in the development of soil nutrient norms for soyabean production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **18**: 1379-1401.
- Faci J.M., Bensaci A., Slatni A. & Playan E. (2000). A case study for irrigation modernisation I. Characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agricultural Water Management* **42**: 313 - 334.

- FAO (2002). *Crops and drops: Making the best use of water for agriculture*. Rome, Italy, 22 p.
- FAOSTAT (2009). *Data on date palm oases production in Tunisia between 1961 and 2007*.
[online] URL <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>.
- Faysse N. (2005). Coping with the tragedy of the commons: game structure and design of rules. *Journal of Economic Surveys* **19**(2): 239–261.
- Ferry M. (1996). La crise du secteur phoenicole dans les pays méditerranéens. Quelles recherches pour y répondre ? In Le palmier- dattier dans l'agriculture d'oasis des pays méditerranéens, CIHEAM/Estacion Phoenix, A/28 : 129- 156.
- Fontenelle J-P. (2004). *Dynamiques agraires, irrigation et institutions dans le delta du Fleuve Rouge (Viêt-nam) Une analyse multi-scalaire de la gestion agricole de l'eau*. PhD. en sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université Catholique de Louvain, 449 p.
- Gammoudi T. & Sghaier M. (2007). Contribution à l'évolution d'impact de l'émigration internationale sur la région de départ: cas de l'oasis de Fatnassa, sud-ouest de la Tunisie. *New Medit* **3**: 60-64.
- Gharbi N. (2009). Aménagements hydrauliques et amélioration de la gestion de l'eau dans les oasis du sud. In Marlet S. & Mekki I. (Eds) Atelier "Gestion des ressources naturelles et développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua", 25-27 février 2009, Douz, Tunisie (sous presse).
- Ghazouani W., Marlet S., Mekki I. & Vidal A. (2010). Farmers' practices and community-management of irrigation: Why do they not match in Fatnassa oasis (South Tunisia)? Under revision for *Irrigation and drainage*.
- Ghazouani W., Marlet S., Mekki I. & Vidal A. (2009). Farmers' perceptions and engineering approach in the modernization of a community-managed irrigation scheme. A case study from an oasis of the Nefzawa (South of Tunisia). *Irrigation and Drainage* **58**: S285-S296.
- Ghazouani W., Marlet S., Mekki I. & Vidal A. (2007). Diagnostic et analyse du fonctionnement d'un périmètre oasien. Cas de l'oasis de Fatnassa Nord, Kébili, sud tunisien. In Kuper M. & Zaïri A. (Eds) Actes du troisième atelier régional du projet Sirma. Cirad, Montpellier, France, colloques-cédérom., 4-7 juin 2007, Nabeul, Tunisie.
- Ghumman A.R., Khan Z. & Turrall H. (2009). Study of feasibility of night-closure of irrigation canals for water saving. *Agricultural Water Management* **96**: 457-464.
- 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.
- Hamdane A. (2007). Tunisie. In UNEP, MAP et Plan Bleu (Eds) Gestion de la demande en eau, progrès et politiques : Actes du 3^{ème} atelier régional sur l'eau et le développement durable en Méditerranée, 19-21 mars 2007, Saragosse, Espagne. MAP Technical Reports Series No. 168, pp 647-688.
- Haw M., Cocklin C. & Mercer D. (2000). A pinch of salt: landowner perception and adjustment to the salinity hazard in Victoria, Australia. *Journal of Rural Studies* **16**: 155-169.
- Heakal M.S. & Al-Awajy M.H. (1989). Long-term effects of irrigation and date-palm production on Torripsamments, Saudi Arabia. *Geoderma* **44**: 261-273.

- Hillel D. (2000). *Salinity Management for Sustainable Irrigation. Integrating Science, Environment and Economics*. Environmentally and socially sustainable development. The World Bank, Washington, 102 p.
- Hinrichsen D. (1997). Gagner la course à l'alimentation. *Population Reports, Série M, No. 13*. Baltimore, Johns Hopkins University School of Public Health, Population Information Program, Décembre 1997, [online] URL <http://www.infoforhealth.org/pr/prf/fm13/fm13creds.shtml>
- 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.
- Isidoro D., Quílez D. & Aragüés R. (2004). Water balance and irrigation performance analysis: La Violada irrigation district (Spain) as a case study. *Agricultural Water Management* **64**: 123-142.
- Jamin J.Y., Bisson P., Fusillier J.L., Kuper M., Maraun F., Perret S. & Vandersypen K. (2005). La participation des usagers à la gestion de l'irrigation : des mots d'ordre aux réalités dans les pays du sud. In Les colloques de l'Académie d'agriculture de France (1), pp. 65-83, Paris, France
- Job J.O., Loyer J.Y. & Ailoul M. (1987). Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cah ORSTOM, ser Pédol XXIII*: 123-131.
- Johnson C.K., Mortensen D.A., Wienhold B.J., Shanahan J.F. & Doran J.W. (2003). Site-Specific Management Zones Based on Soil Electrical Conductivity in a Semiarid. Cropping System. *Agronomy journal* **95**: 303-315.
- Juana L., Rodriguez-Sinobas L., Sánchez R. & Losada A. (2007). Evaluation of drip irrigation: Selection of emitters and hydraulic characterization of trapezoidal units. *Agricultural Water Management* **90**: 13 - 26.
- Kadri A. & Ranst E.v. (2002). Contraintes de la production oasienne et stratégies pour un développement durable. Cas des oasis de Nefzaoua (Sud tunisien). *Science et changements planétaires / Sécheresse* **13**: 5-12.
- Kara T. & Willardson L.S. (2006). Leaching Requirements to Prevent Soil Salinization. *Journal of Applied Sciences* **6**: 1481-1489.
- Karajeh F., Hamdy A., Bruggeman A., Touchan H. & Oweis T. (2003). In vitro salinity tolerance screening of some legumes and forages cultivars. *Options Méditerranéennes Série B n. 44*: 163-169.
- Kassah A. (1996). *Les oasis tunisiennes : aménagement hydro-agricole et développement en zone aride*. Faculté des lettres et sciences humaines de Tunis, 13^{ème} série, Géographie, 346 p.
- Kassab A. (1980). Problèmes des oasis tunisiennes. Faculté des lettres et sciences humaines de Tunis 2e série : *Géographie VI* : 391-412.
- Kassah A. (1998). Eau et développement agricole au Sahara maghrébin : enjeux, conflits et arbitrages. *Sécheresse* **9**: 95-102.
- Khan N.M., Rastoskuev V.V., Sato Y. & Shiozawa S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management* **77**: 96-109.

- 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. (2003). Water Productivity under Saline Conditions. **In** Kijne J.W., Barker R. & Molden D. (Eds) *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement* Wallingford, UK, CABI Publishing, pp 89-102.
- 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.
- 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**. IWMI, Colombo, Sri Lanka, 35p.
- Kolkman M.J., van der Veen A. & Geurts P.A.T.M. (2007). Controversies in water management: Frames and mental models. *Environmental Impact Assessment Review* **27**: 685-706.
- Koo S.R., Son H.S. & Seong P.H. (2003). A method of formal requirement analysis for NPP I&C systems based on UML modeling with software cost reduction. *The Journal of Systems and Software* **67**: 213-224.
- 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. & 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.
- Lado C. (2004). Sustainable environmental resource utilisation: a case study of farmers' ethnobotanical knowledge and rural change in Bungoma district, Kenya. *Applied Geography* **24**: 281 - 302.
- Lamaddalena N. & Sagardoy J.A. (2000). *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems*. Irrigation and Drainage Paper, **59**, FAO Rome, Italy, 133 p.
- Lark R.M., Bellamy P.H. & Kirk G.J.D. (2006). Baseline values and change in the soil, and implications for monitoring. *European Journal of Soil Science* **57**: 916-921.
- Le Gal P.Y. & Papyh F. (1998). Co-ordination Processes in a Collectively Managed Cropping System: Double Cropping of Irrigated Rice in Senegal. *Agricultural Systems* **57**: 135-159.
- Lecomte C. (2005). *L'évaluation expérimentale des innovations variétales Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype - milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences*. PhD. de l'INAPG, 173 p.

- Leterme B., Vanclooster M., Rounsevell M.D.A. & Bogaert P. (2006). Discriminating between point and non-point sources of atrazine contamination of a sandy aquifer. *Science of The Total Environment* **362**: 124-142.
- Lewandowski I. & Schmidt U. (2006). Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **112**: 335-346.
- Li G., Rozelle S. & Brandt L. (1998). Tenure, land rights, and farmer investment incentives in China. *Agricultural Economics* **19**: 63-71.
- 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.
- Luedeling E., Nagieb M., Wichern F., Brandt M., Deurer M. & Buerkert A. (2005). Drainage, salt leaching and physico-chemical properties of irrigated man-made terrace soils in a mountain oasis of northern Oman. *Geoderma* **125**: 273-285.
- Luyet V. (2005). *Bases méthodologiques de la participation lors de projets ayant des impacts sur le paysage. Cas d'application : La plaine du Rhône valaisanne*. Sciences et Ingénierie de l'Environnement, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 170 p.
- Ma W., Mao Z., Yu Z., van Mensvoort M.E.F. & Driessen P.M. (2007). Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of winter wheat-maize in North China Plain. *Irrigation and Drainage Systems*, DOI 10.1007/s10795-007-9027-1, 16 p.
- Maas E.V. & Hoffman G.J. (1977). Crop salt tolerance - Current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE* **103(IRZ)**, pp. 115-134.
- Maas E.V. & Hoffman G.J. (1976). Crop salt tolerance: Evaluation of existing data. **In** Proceeding of the International Salinity Conference, 16-20 August 1976, Lubbock, Texas, pp 187-198.
- Maggio A., De Pascale S., Ruggiero C. & Barbieri G. (2005). Physiological response of field-grown cabbage to salinity and drought stress. *European journal of agronomy* **23**: 57-67.
- Malano H. & Burton M. (2001). *Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector*. IPTRID Secretariat, FAO, Rome, Italy, 29 p.
- Makowski D., Doré T. & Monod H. (2007). A new method to analyse relationships between yield components with boundary lines. *Agron Sustain Dev* **27**: 119-128.
- Mamou A. & Hlaimi A. (1999). *Les Nappes de la Nefzawa. Caractéristiques et Exploitation*. Ministère de l'Agriculture, DGRE, Tunis.
- Marini C.M. & Ongaro L. (1988). La carta delle oasi del Nefzaoua, un esempio di analisi digitale di immagini da satellite. *Rivista di Agricoltura Subtropicale e Tropicale* **62(1-2)**: 91-102.
- Marlet S., Bouksila F. & Bahri A. (2009). Water and salt balance at irrigation scheme scale: a comprehensive approach for salinity assessment in a Saharan oasis. *Agricultural Water Management* **96**: 1311-1322.
- Marlet S., Hammami A., Hartani T., Kuper M. & Zairi A. (2006). Enjeux et contraintes liés à la modernisation de l'agriculture irriguée dans les pays du Maghreb. *AgroLine* **54**: 21-30.
- Mathieu P., Aubriot O. & Benali A. (2001). Water rights, investments and meanings: conflict and change in a traditional irrigation system in northern Morocco. *International Journal of Water* **1**: 270-284.

- McDaniels T.L. & Gregory R. (2004). Learning as an Objective within a Structured Risk Management Decision Process. *Environmental Science & Technology* **38**: 1921-1926
- Mehari A., Schultz B. & Depeweg H. (2006). Salinity impact assessment on crop yield for Wadi Laba spate irrigation system in Eritrea. *Agricultural Water Management* **85**: 27-37.
- Mekki I., Jacob F., Marlet S. & Ghazouani W. (2009). Analyzing oases sustainability in Tunisia- the case of the Nefzawa region. Submitted to *Regional environmental change*.
- Meynard J.M. (2005). Agronomie et développement durable : Evolution de la discipline, de ses questions et de ses pratiques. In *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, **91(5)**: 1-11.
- Meynard J.M. & David G. (1992). Diagnostic de l'élaboration du rendement des cultures. *Cahiers d'agriculture* **1**: 9-19.
- Milleville P. (1987). Recherches sur les pratiques des agriculteurs. *Cahiers de la Recherche-Développement* **16**: 3-7.
- Milne A.E., Ferguson R.B. & Lark R.M. (2006). Estimating a boundary line model for a biological response by maximum likelihood. *Annals of Applied Biology* **149**: 223-234.
- Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques (MARH) & Groupement Interprofessionnel des Fruits (GIF). (2007). *Statistiques agricoles*.
- Misak R.F., Baki A.A.A. & El-Hakim M.S. (1997). On the causes and control of the waterlogging phenomenon, Siwa Oasis, northern Western Desert, Egypt. *Journal of Arid Environments* **37**: 23-32.
- Molden D.J. & Gates T.K. (1990). Performance Measures for Evaluation of Irrigation-Water-Delivery Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **116(6)**: 804-823.
- Morlon P. & Benoit M. (1990). Étude méthodologique d'un parcellaire d'exploitation agricole en tant que système. *Agronomie* **6**: 499-508.
- Mtimet A. (2009). Dégradation des terres et pratique d'amendements sableux dans les oasis (cas de Kébili). In Marlet S. & Mekki I. (Eds) Atelier "Gestion des ressources naturelles et développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua", 25-27 février 2009, Douz, Tunisie (sous presse).
- Munier P. (1973). *Le Palmier Dattier*. Maisonneuve et Larose, Paris, France, 221 p.
- Munns R. (2005). Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist* **167**: 645-663.
- Navarette M. & Le Bail M. (2007). SALADPLAN: a model of the decision-making process in lettuce and endive cropping. *Agronomy for Sustainable Development* **27**: 209-221.
- Neira X.X., Alvarez C.J., Cuesta T.S. & Cancela J.J. (2005). Evaluation of water-use in traditional irrigation: An application to the Lemos Valley irrigation district, northwest of Spain. *Agricultural Water Management* **75**: 137-151.
- Norman W.R., McCann I. & Al-Ghafri A. (2008). On-farm labour allocation and irrigation water use: case studies among smallholder systems in arid regions. *Irrigation and Drainage Systems* **22**: 79-92.
- Object Management Group (OMG) (1999). *Unified Modeling Language Specification*. Version 1.3, June 1999, 808 p.

- Observatoire Nationale d'Agriculture (ONAGRI) (2001). *La campagne d'exploitation des dattes 2000-01. Bulletin de l'ONAGRI, n°53, [online]* URL <http://www.onagri.nat.tn/Bulletin/bull53.PDF>.
- Ochs W. & Plusquellec H. (2003). Irrigation and drainage development. In: Davis R. & Hirji R. (eds) *Water Resources and Environment technical note E1*. The World Bank, Washington DC, p 31.
- 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.
- Orr A. & Ritchie J.M. (2004). Learning from failure: smallholder farming systems and IPM in Malawi. *Agricultural Systems* **79**: 31-54
- Pahl-Wostl C. (2005). Information, public empowerment, and the management of urban watersheds. *Environmental Modelling & Software* **20**: 457-467.
- Palluat N., Racoceanu D. & Zerhouni N. (2006). A neuro-fuzzy monitoring system Application to flexible production systems. *Computers in Industry* **57**: 528-538.
- Penning de Vries F.W.T., Sally H. & Inocencio A. (2005). Opportunities for Private Sector Participation in Agricultural Water Development and Management. **Working paper 100**, IWMI, Colombo, Sri Lanka, 50p.
- 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. (1999). Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. *Agricultural Water Management* **40**: 153-169.
- Peyron G. (2000). *Cultiver le palmier dattier. Guide illustré de formation*. Editions Quae, La librairie du CIRAD, France, 112 p.
- Phengphaengsy F. & Okudaira H. (2008). Assessment of irrigation efficiencies and water productivity in paddy fields in the lower Mekong River Basin. *Paddy Water Environment* **6**: 105-114.
- Playán E., Slatni A., Castillo R. & Faci J.M. (2000). A case study for irrigation modernisation II. Scenario analysis. *Agricultural Water Management* **42**: 335-354.
- Plusquellec H. (2002). Is the daunting challenge of irrigation achievable? *Irrigation and Drainage* **51**: 185-198.
- Prathapar S.A., Meyer W.S., Madden J.C. & Alocilja 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.
- Qureshi A.S., Hussain A. & Makin I. (2002). Integrated database development for river basin management: An example from Rechna Doab. **Working paper 53**, IWMI, Lahore, Pakistan, 36 p.
- Ragab R., Malash N., Abdel Gawad G., Arslan A. & Ghaibeh A. (2005). A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management 2. The SALTMED model

- validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management* **78**: 89-107.
- Renger R. & Titcomb A. (2002). A Three-Step Approach to Teaching Logic Models. *American Journal of Evaluation* **23**: 493-503.
- Rhoades J.D., Lesch S.M., LeMert R.D. & Alves W.J. (1997). Assessing irrigation/drainage/salinity management using spatially referenced salinity measurements. *Agricultural Water Management* **35**: 147-165.
- Rhoades J.D. (1980). Determining leaching fraction from field measurements of soil electric conductivity. *Agricultural Water Management* **81(3)**: 205-215.
- Ruf T. (1998). Du passage d'une gestion par l'offre en eau à une gestion par la demande sociale : Ordre et désordre dans les questions d'irrigation et de conflits d'usage de l'eau. **In** Colloque Irrigation et gestion collective de l'eau en France et dans le Monde. 3 au 19 novembre 1998. SFER, Cemagref, IRD, Agropolis, 27 p.
- Ruf T. (1984). La coexistence de systèmes de production différents dans une région du delta du Nil : Intérêt de l'approche historique pour le diagnostic régional et pour l'action de développement. *Les Cahiers de la Recherche-Développement* **3-4**: 30-41.
- Sabatier J.L. & Ruf T. (1995). La gestion sociale de l'eau. *Infores'eau* **6**: 9-11.
- 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.
- Sabourin E., Sidersky P., Matos L.C. & Trier R. (2002). Gestion technique vs gestion sociale de l'eau dans les systèmes d'agriculture familiale du Sertão brésilien. *Sécheresse* **13(4)**: 274-283.
- Saeed A.B., Etewy H.A. & Aly Hassan O.S. (1990). Watering requirement and scheduling of date palm. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America* **21(4)**: 49-52.
- Saeed M.M., Ashraf M. & Bruen M. (2002). Diagnostic analysis of farmers' skimming well technologies in the Indus Basin of Pakistan. *Irrigation and Drainage Systems* **16**: 139-160.
- Sanyu Consultants Inc. (1996). *Etude de faisabilité du projet d'amélioration des périmètres irrigués dans les oasis du sud en république de Tunisie*. DG/GREE, MARH: Tunis.
- Sarfatti P. (1988). Il clima del governatorato di Kebili in Tunisia. *Rivista di Agricoltura Subtropicale e Tropicale* **62 (1-2)**: 23-35.
- Sarma P.B.S. & Rao V.V. (1997). Evaluation of an irrigation water management scheme -- a case study. *Agricultural Water Management* **32**: 181-195.
- Sebillotte M. & Soler L.G. (1989). Les processus de décision des agriculteurs. Acquis et questions vives. **In** Actes du séminaire SAD : modélisation systémique et système agraire - décision et organisation, INRA, Paris, France
- Sébillotte M. (1978). Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. **In** Académie d'Agriculture de France, tome 64, n° 11, pp 906-914.
- Sellami M.H. & Sifaoui M.S. (2008). Modelling of heat and mass transfer inside a traditional oasis: Experimental validation. *Ecological modelling* **210**: 144-154.

- Sghaier M. (2006). Région saharienne du Nefzaoua. **In** Picouet M. (ed) Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers le cas de la Tunisie. CICRED, Paris, pp 167-181.
- Sghaier M. (1995). Les agrosystèmes de production oasiens et leur rôle socio-économique, cas des oasis tunisiennes. **In** Coude-Gaussen G. & Rognon P. (eds) Désertification et Aménagement au Maghreb, L'Hartmann: Paris, pp. 203–213.
- Shani U., Ben-Gal A., Tripler E. & Dudley L.M. (2007). Plant response to the soil environment: an analytical model integrating yield, water, soil type, and salinity. *Water resources research* **43** (W08418), 12 p.
- Shani U., Ben-Gal A. & Dudley L.M. (2005). Environmental Implications of Adopting a Dominant Factor Approach to Salinity Management. *Journal of Environmental Quality* **34**: 1455-1460.
- Shani U. & Dudley L.M. (2001). Field Studies of Crop Response to Water and Salt Stress. *Soil Science Society of America Journal* **65**: 1522-1528.
- Sharhrokhnia M.A. & Avan M.J. (2005). Performance assessment of Doroodzan irrigation network by steady state hydraulic modeling. *Irrigation and Drainage Systems* **19**: 189-206.
- Siebert S., Nagieb M. & Buerkert A. (2007). Climate and irrigation water use of a mountain oasis in northern Oman. *Agricultural Water Management* **89**: 1-14.
- Sileshi G.W., Kuntashula E., Matakala P. & Nkunika P.O. (2008). Farmers' perceptions of tree mortality, pests and pest management practices in agroforestry in Malawi, Mozambique and Zambia. *Agroforestry systems* **72**: 87-101.
- Şimşek M., Tonkaz T., Kaçİra M., Çömlekçioğlu N. & Doğan Z. (2005). The effects of different irrigation regimes on cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield and yield characteristics under open field conditions. *Agricultural Water Management* **73**: 173-191.
- Singh A.K., Sikka A.K., Upadhyaya A., Bhatnagar P.R., Dhanphule S., Singh M.K. & Singh S.R. (2007). Scientific perceptions and community responses in a participatory water management endeavor. *Water Resources Management* **22**(9): 1173-1189.
- 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.
- Skaggs T.H., Genuchten M.T.v., Shouse P.J. & Poss J.A. (2006). Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agricultural Water Management* **86**: 140-149.
- Smith J.L. (2008). A critical appreciation of the "bottom-up" approach to sustainable water management: embracing complexity rather than desirability. *Local Environnement* **13**: 353-366.
- Special Assistance for Project Implementation (SAPI) study team. (2005). *Irrigation perimeters improvement project in oasis in south Tunisia*. DG/GREE, MARH: Tunis.
- STUDI & BRL Ingénierie (1999). *Projet d'amélioration des périmètres irrigués dans les oasis du Sud. Projet de Kébili*. Première tranche, phase I, volume 2, oasis de Fatnassa. Edition définitive, 21 p., annexes et plans.
- Tabet D. (1999). *Intérêt d'une approche spatiale pour le suivi de la salinité des sols dans les périmètres irrigués*. PhD. en Sciences de l'eau, ENGREF, 340 p.

- Tanaka Y. & Sato Y. (2005). Farmers managed irrigation districts in Japan: Assessing how fairness may contribute to sustainability. *Agricultural Water Management* **77**: 196-209.
- Toderi M., Powell N., Seddaiu G., Roggero P.P. & Gibbon D. (2007). Combining social learning with agro-ecological research practice for more effective management of nitrate pollution. *Environmental Science & Policy* **10**: 551-563.
- Tripler E., Ben-Gal A. & Shani U. (2007). Consequence of salinity and excess boron on growth, evapotranspiration and ion uptake in date palm (*Phoenix dactylifera* L., cv. Medjool). *Plant Soil* **297**: 147-155.
- Tyagi N.K., Agrawal A., Sakthivadivel R. & Ambast S.K. (2005). Water management decisions on small farms under scarce canal water supply: A case study from NW India. *Agricultural Water Management* **77**: 180-195.
- Umali D.L. (1993). *Irrigation-induced salinity. A growing problem for development and the environment*. Technical paper no215, The World Bank, Washington DC, 78 p.
- Uphoff N. (1986). *Improving International Irrigation Management with Farmer Participation: Getting the Process Right*. Boulder: Westview Press, XIV, 215 p.
- van der Molen W.H., Martínez Beltrán J. & Ochs W.J. (2007). *Guidelines and computer programs for the planning and design of land drainage systems*. FAO, Rome, Italy.
- Van der Schans M.L. & Lempérière P. (2006). *Manual: Participatory Rapid Diagnosis and Action Planning for Irrigated Agricultural Systems (PRDA)*. IPTRID/IWMI/FAO, Rome, Italy, 168 p.
- Vandersypen K., Keita A.C.T., Kaloga K., Coulibaly Y., Raes D. & Jamin J.Y. (2006). Sustainability of farmers' organization of water management in the Office du Niger irrigation scheme in Mali. *Irrigation and Drainage* **55**: 51-60.
- Vicente G. & Partidario M.R. (2006). SEA - Enhancing communication for better environmental decisions. *Environmental Impact Assessment Review* **26**: 696-706.
- Vidal A., Rigourd C. & Nepveu de Villemarceau A. (2004). *Identification et diffusion de bonnes pratiques sur les périmètres irrigués en Afrique de l'Ouest*. Rapport final du projet IPTRID GCP/RAF/355/FRA. IPTRID, FAO, Rome, Italy, 46 p.
- Vidal A., Tabet D., Zimmer D., Ahmad M.-u.-d., Asif S. & Strosser P. (1997). Salinity Assessment in Irrigation Systems using Remote Sensing and GIS Application to Chishtian Subdivision, Pakistan. Paper presented at "The collaboration between IIMI and CEMAGREF in Pakistan", October 3, 1997, IIMI, Lahore, Pakistan, pp48-55.
- Watson D.J. & Drysdale G. (2005). Irrigation practices on north-east Victorian dairy farms: a survey. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **45**: 1539-1549.
- Webb R.A. (1972). Use of the Boundary Line in the analysis of biological data. *Journal of Horticultural Science* **47**: 309-319.
- Willock J., Deary I.J., McGregor M.M., Sutherland A., Edwards-Jones G., Morgan O., Dent B., Grieve R., Gibson G. & Austin E. (1999). Farmers' Attitudes, Objectives, Behaviors, and Personality Traits: The Edinburgh Study of Decision Making on Farms. *Journal of Vocational Behavior* **54**: 5-36.
- Yunus Miah M., Mannan M.A., Mahmud K.G., Quddus M.A.M. & Baida T. (2004). Salinity on cultivable land and its effects on crops. *Pakistan Journal of Biological Sciences* **7**: 1322-1326.

- Zammouri M., Siegfried T., El-Fahem T., Kriâa S. & Kinzelbach W. (2007). Salinization of groundwater in the Nefzawa oases region, Tunisia: results of a regional-scale hydrogeologic approach. *Hydrogeology Journal* **15**: 1357-1375.
- Zapata N., Playà E., Martínez-Cob A., Sánchez I., Faci J.M. & Lecina S. (2007). From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas. *Agricultural Water Management* **87**: 187-199
- Zardari N.H. & Cordery I. (2009). Estimating the effectiveness of a rotational irrigation delivery system: a case study from Pakistan. *Irrigation and Drainage*, DOI: 10.1002/ird.483, 14 p.

Annexe

Table 1: List of focal points and probing questions used in the interviews

1 General description of the farming land:
- Field acquirement (inheritance, purchase, <i>haouz</i>*) - What is the exact planting year of date palm trees in this parcel? What was the irrigation source used? - What was the cadence of plantation (gradually or at the same time)? - Has the parcel an official water right? Since when?
2 General information about the land owner and the irrigator:
- What is the principal job of the land owner? Is he resident in the Fatnassa village? - Who generally irrigate?
3 Agricultural practices:
3.1 The periodic sand and organic manure inputs combined with plowing:
- Do you practice the supply of sand and organic manure? Why? With which frequency? Why this frequency? - o If the interviewee evokes the problem of waterlogging, how do you perceive the problem? What are the causes and effects? What are your practices to minimize these effects? - o If the interviewee evokes the problem of high soil salinity, how do you perceive the problem? What are the causes and effects? What are your practices to minimize these effects?
3.2 Cropping system
- Have you planted fruit trees? If yes, why it does not exist anymore (in the parcel)? If no, why haven't you? If the interviewee responds it is the problem of the high temperature of the irrigation water, what are the causes and what are the others effects? What are your practices to minimize these effects? - Have you cultivated fodder crops? If yes, why it does not exist anymore? If no, why haven't you? - What varieties of date palm do you growing? Why this choice? - Could you please assess the yield and date quality (quantitative or qualitative)?
4 Irrigation practices:
4.1 Irrigation system: Why do you adopt this irrigation system?
4.2 Summer irrigation:
- What is the irrigation frequency? Is it sufficient? If no, what are the causes and effects? What are your practices to minimize these effects? - Do you and how you perceive the effects of water shortage on the date palm? When it occurs?
4.3 Winter irrigation:
- Do you irrigate frequently during winter season? Why and what are the reasons? - The irrigation duration with regards to the summer one (longer or shorter)? Why this difference? - o If the interviewee responds it is the problem of waterlogging, how do you perceive it? What are its causes and effects? What are your practices to minimize these effects? - o If the interviewee responds it is the problem of soil salinity, how do you perceive the problem? What are the causes and the effects? What are your practices to minimize these effects?
5 Drainage/Waterlogging/Salinity
If the interviewee does not evoke the problems of waterlogging and salinity in any stage during the interview, the question is: do you and how do you perceive these problems? What are its causes and effects? And what are your practices?
6 Summarize
Could you, please, summarize the most important constraints in the oasian scheme?

*: an official extension

Pied de variétés communes 'Allig'



Pied Deglet Nour



Figure 1 : Les deux principales variétés de dattes (couleur des régimes)

**Dattes branchées (en caisses),
dattes en vrac et déchets**



Dattes sèches



Dattes non pollinisées (déchet)



Figure 2 : Les différentes catégories de dattes Deglet Nour

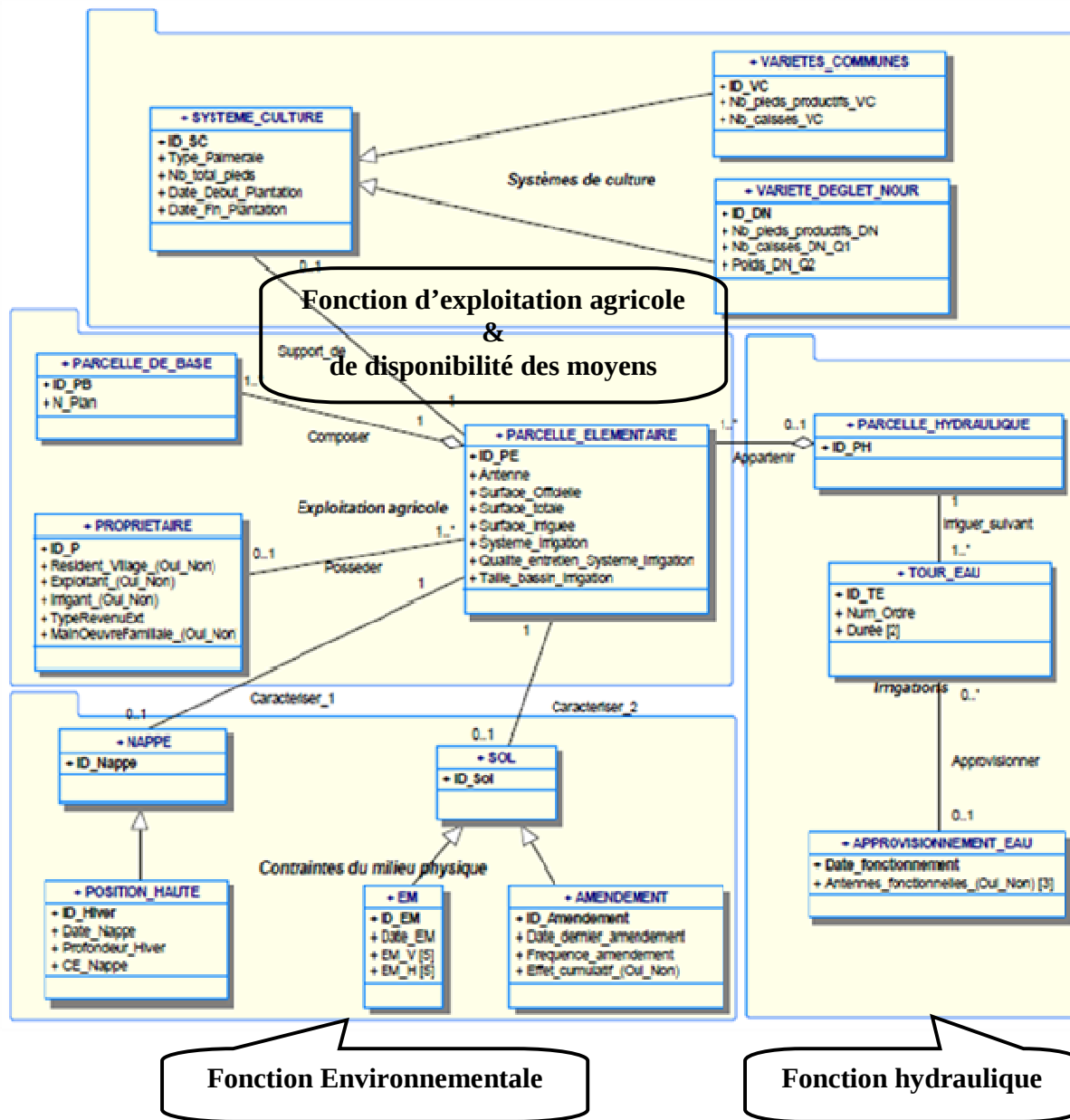


Figure 3 : Package et diagramme de classes.

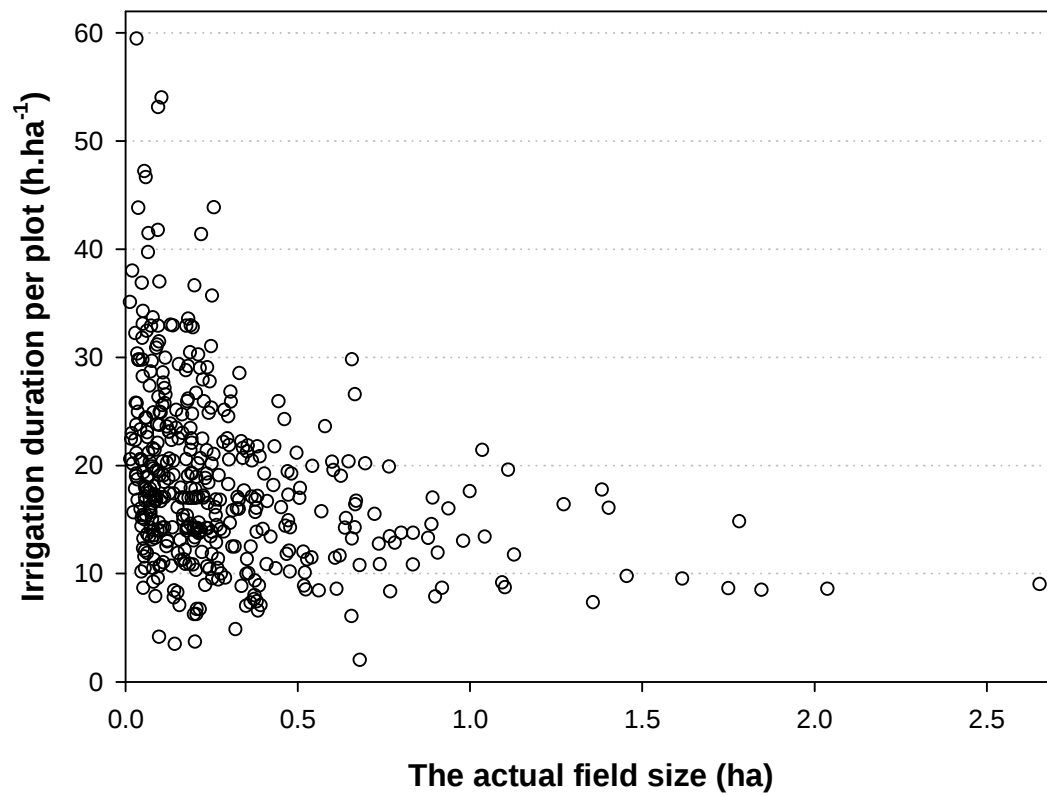


Figure 4: Variability of the irrigation duration according to the surface area (n=419, 2006-07)

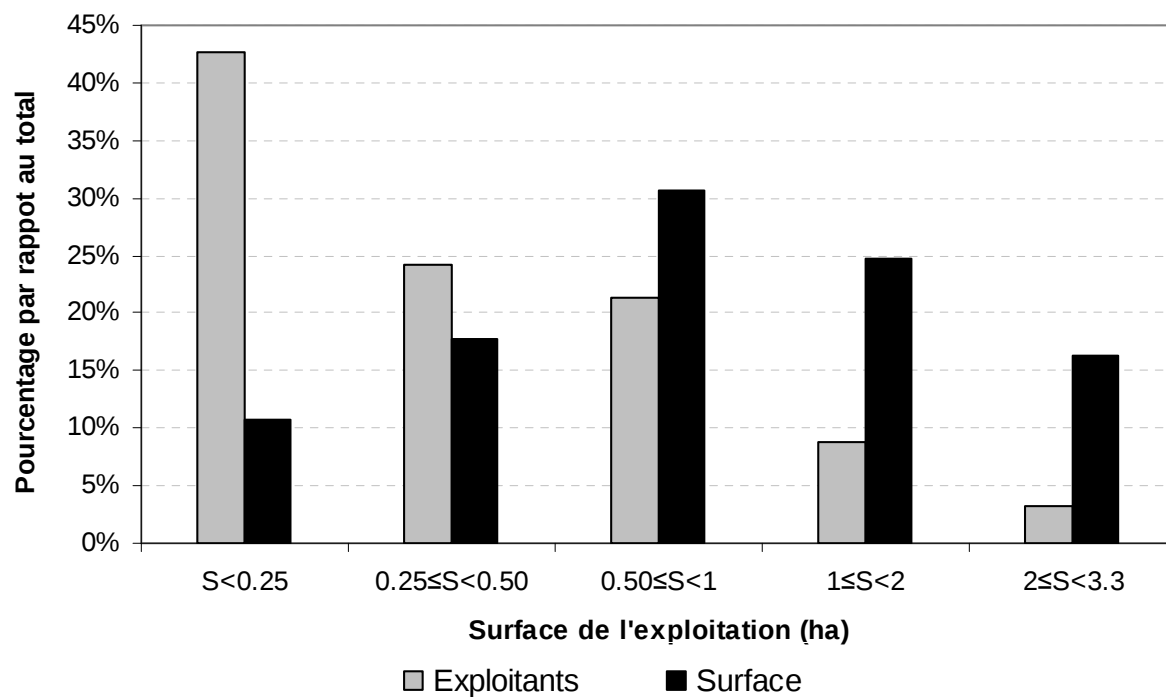


Figure 5 : Caractérisation de l'exploitation (n=286 exploitations, Surface totale = 137.44 ha, 2006-07)

Tableau 2 : Analyse de la variance de la performance du palmier dattier, résultats des ANOVA deux facteurs ; 2006-07 et n=337

	Quantité moyenne (kg.pied ⁻¹)	Qualité moyenne (% du total)
Durée d'irrigation annuelle (h.ha⁻¹)	**	**
10-100	30.07 ^a	27.13 ^a
100-150	29.1 ^a	29.87 ^a
150-425	39.94 ^b	40.81 ^b
Nombre des irrigations hivernales	**	***
0-2	29.55 ^a	26.92 ^a
3-5	36.52 ^b	38.29 ^b
Durée d'irrigation annuelle (h.ha⁻¹)	***	***
10-100	29.45 ^a	29.70 ^a
100-150	29.26 ^a	30.96 ^a
150-425	40.71 ^b	44.71 ^b
Nombre des irrigations estivales	NS	*
1-4	34.25	31.24 ^a
5-6	32.03	39.01 ^b
Durée d'irrigation annuelle (h.ha⁻¹)	***	*
10-100	27.93 ^a	23.24 ^a
100-150	22.27 ^a	23.78 ^a
150-425	38.92 ^b	36.67 ^b
Salinité du sol (dS.m⁻¹)	***	***
2-10	39.56 ^a	38.46 ^a
10-18	32.12 ^{ab}	36.38 ^a
18-50	23.12 ^b	21.83 ^b
Durée d'irrigation annuelle (h.ha⁻¹)	**	***
10-100	29.49 ^a	26.66 ^a
100-150	29.96 ^a	30.18 ^a
150-425	39.53 ^b	43.54 ^b
Profondeur de la nappe (m)	NS	*
0.55-0.75	31.72	29.74 ^a
0.75-1.31	34.26	37.18 ^b
Nombre des irrigations hivernales	***	***
0-2	27.34 ^a	25.46 ^a
3-5	36.83 ^b	36.83 ^b
Profondeur de la nappe (m)	NS	*
0.55-0.75	30.71	27.68 ^a
0.75-1.31	33.46	34.61 ^b
Salinité du sol (dS.m⁻¹)	***	***
2-10	39.99 ^a	39.98 ^a
10-18	31.23 ^b	34.5 ^b
18-50	20.90 ^b	19.88 ^b
Fréquence des amendements	*	*
3 à 5 années	32.65 ^a	32.52 ^a
> 6 ans	25.67 ^b	22.94 ^b
Salinité du sol (dS.m⁻¹)	***	***
2-10	38.81 ^a	35.75 ^a
10-18	30.24 ^a	33.69 ^a
18-50	20.57 ^b	18.55 ^b
Nombre des irrigations hivernales	NS	*
0-2	25.9	22.32
3-5	30.52	29.02
Salinité du sol (dS.m⁻¹)	***	**
2-10	40.81 ^a	39.46 ^a
10-18	30.89 ^a	33.99 ^a
18-50	22.68 ^b	22.15 ^a
Profondeur de la nappe (m)	NS	NS
0.55-0.75	29.94	26.71
0.75-1.31	29.11	29.05
Conduite de la palmeraie	***	***
Conduite intensive	37.49 ^a	44.02 ^a
Conduite de survie	25.51 ^b	18.79 ^b
Conduite d'extension	18.92 ^b	26.23 ^b
Densité de plantation (pieds.ha⁻¹)	*	NS
75 - 150	28.07	34.69
150 - 200	30.35	35.8
200 - 250	31.05	31.51
250 - 300	35.99	28.66
300 - 678	28.35	33.42

Les comparaisons des moyennes selon le test de Holm-Sidak sont significatives pour ^{a,b,c} au seuil de 5%

NS : non significatif