



THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par l'**Institut National d'Etudes Supérieures
Agronomiques Montpellier SupAgro – France**

Préparée au sein de l'école doctorale GAIA
Et de l'unité de recherche UMR SYSTEM

Spécialité : **Sciences agronomiques**

Présentée par **Yosser BEN ZEKRI MGHIRBI**

**ANALYSE DES COMPROMIS ENTRE LA
PRODUCTION ET L'EFFICIENCE DE L'EAU ET
DE L'AZOTE DANS LES SYSTEMES CEREALIERS
MEDITERRANEENS A BASE DE BLE DUR**

Soutenue le 06 Juillet 2017 devant le jury composé de



M. Jacques WERY, Professeur, SupAgro Montpellier (France)	Directeur de thèse
M. Nicolas MUNIER-JOLAIN, Ingénieur de recherche, INRA-Dijon (France)	Rapporteur
Mme. Chantal LOYCE, Maître de conférences, AgroParisTech (France)	Rapporteur
M. John Roy PORTER, Professeur, Université de Copenhague (Danemark)	Examineur
M. François AFFHOLDER, Chercheur, CIRAD Montpellier (France)	Examineur
M. BEN HAJ SALAH Halim, Professeur, INAT (Tunisie)	Examineur

« L'Université n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur ».

Remerciements

Au terme de ce travail de recherche, j'ai le plaisir de présenter mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué, aussi bien d'un point de vue strictement scientifique qu'humain, à me faire avancer dans cette aventure.

Je remercie le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de la Tunisie et l'Institution de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur Agricole de la Tunisie (IRESA) pour la bourse nationale d'excellence qu'ils m'ont attribuée afin de poursuivre mes études en doctorat. Je remercie aussi l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier – France (CIHEAM-IAMM) et l'Institut National des Recherches en Génie Rural Eaux et Forêts – Tunisie (INRGREF) pour les soutiens financiers et scientifiques.

Je tiens, d'abord, à adresser mes sincères remerciements à mon directeur de thèse Monsieur Jacques WERY (Professeur à Montpellier SupAgro, France) qui a accepté de diriger cette thèse et pour l'attention qu'il a apporté à mon travail. Je vous remercie d'avoir été disponible et attentif et d'avoir facilité le déroulement de la thèse par votre appui scientifique et académique précieux pour finaliser les corrections de cette thèse. Je vous remercie aussi pour vos soutiens inconditionnels personnels et professionnels, votre compréhension, vos précieux conseils et votre confiance témoignée au long de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements et gratitude à mon encadrant Monsieur Hatem BELHOUCETTE (Enseignant chercheur à l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier – CIHEAM-IAMM, France) pour l'intérêt et la patience qu'il a témoigné en encadrant et en guidant ce travail et pour le temps qu'il m'a accordé pour le suivi du déroulement de la thèse, les corrections et la validation des travaux.

Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ma thèse et se sont rendus disponibles pour ma soutenance. J'aimerais également remercier les membres de mon comité de thèse, et particulièrement Lydie GUILIONI pour son soutien précieux et ses conseils pertinents.

Un grand merci à Madame Insaf MEKKI (Chercheur à l'INRGREF, Tunisie) pour m'avoir encadré sur le terrain du bassin versant de Lebna et m'avoir aidé à l'élaboration du guide d'enquête. Grâce à elle j'ai pu collecter les données agronomiques des exploitations agricoles sur le bassin de Lebna à l'Est de la Tunisie (gouvernorat de Nabeul). Je remercie également les agriculteurs enquêtés.

Je remercie Monsieur Mohamed Ali Ben Romdhane (Direction des Grandes Cultures/Direction Générale de la Production Agricole (DGPA)/Ministère de l'Agriculture et de l'environnement) pour m'avoir aidé à obtenir des données à l'échelle nationale et régionale sur les céréales en Tunisie.

Je remercie également Monsieur Tarek Jarrahi (Ingénieur de recherche à l'institut nationale de grande culture (INGC, Tunisie)) pour m'avoir aidé à obtenir des données collectées sur des parcelles de blé dur auprès des agriculteurs dans les régions de Fernena (Jendouba) et Chebika (Kairouan).

J'exprime ma gratitude à Madame Hélène MARROU (Maître de conférence à Montpellier SupAgro – UMR SYSTEM) pour m'avoir aidé à écrire des scripts sur le logiciel R. Je vous remercie aussi pour le temps que vous m'avez consacré pour paramétrer le modèle SSM-Wheat et avancer dans mon raisonnement scientifique et mes résultats.

Je remercie également Monsieur Karim BARKAOUI (attaché recherche à l'INRA-CIRAD, IAV Hassen II, Maroc) pour m'avoir souvent aidé durant cette thèse, notamment pour les corrections des articles scientifiques, et à chaque occasion que j'ai eu à le solliciter.

Mes remerciements vont également aux instituts et aux organismes : l'unité expérimentale DIASCOPE - Domaine Expérimental de Melgueil (INRA Montpellier SupAgro, France) et le laboratoire d'analyses des eaux, sols, végétaux (CIRAD Montpellier) qui m'ont apporté de l'appui technique et expérimentale et qui m'ont aidé à mettre en place et le suivi de mon protocole expérimental. Je remercie également les agriculteurs enquêtés sur le bassin versant de Lebna dans le gouvernorat de Nabeul.

Je suis également très reconnaissante à tous les enseignants chercheurs et au personnel de l'UMR SYSTEM (Montpellier SupAgro) et de l'IAMM, notamment le service informatique, l'équipe techniques (SYME) et le service scolarité pour l'accueil et l'aide reçue. Merci à Carole, Viviane, Isabelle B, Isabelle F, Marie, Aurélie, Lydie, Bénédicte, Alain, Jean François.

A tous les enseignants qui ont participé à ma formation et à la construction de mes connaissances scientifiques et professionnelles, j'exprime ma gratitude.

Je remercie tous mes collègues de l'UMR SYSTEM (Montpellier SupAgro) et de l'IAMM pour leur encouragement et leur soutien scientifique et moral. Merci à Oswaldo, Nicolas, Fida, Sébastien, Léo, Daniel, Delphine, Meriem H, Lobna...et merci à mes chers amis Meriem M, Islem, Sarra, Ahmed, Zied et Faycel.

Je remercie mon cher époux Oussama MGHIRBI qui m'a soutenu et qui était la lumière de mon chemin de réussite.

Je remercie infiniment ma mère Monia, mon père Fathi, ma sœur Hend, mon frère Ahmed, ma belle-mère Najiba, mon beau-père Moncef, ma belle-sœur Youmna et mon beau-frère Aymen pour leur soutien, leur aide et leur patience.

Un grand merci à mes deux familles BEN ZEKRI et MGHIRBI pour leur aide et leur soutien.

Sans oublier à remercier mon petit ange Malek qui m'a donné espoir pour progression dans ma thèse et qui m'a donné le courage pour finaliser mes travaux de recherche.

Il est difficile de n'oublier personne et je pourrais me contenter de remercier sincèrement tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail et à m'enrichir pendant les cinq années d'études à Montpellier. J'espère qu'ils se reconnaîtront dans ce message de gratitude et de sincérité.

A toutes et à tous, encore MERCI ☺

Avant-propos

Cette thèse a été proposée par l'Institut National d'Etudes Supérieures Agronomiques Montpellier SupAgro et financée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de la Tunisie, l'Institution de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur Agricoles de la Tunisie (IRESA), par le projet ALMIRA et l'Institut National des Recherches en Génie Rural Eaux et Forêts – Tunisie (INRGREF) et par l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier – France (CIHEAM-IAMM).

Les travaux de recherche élaborés au cours de cette thèse représentent une première étape pour la mise en place d'un cadre d'analyse de la relation production/efficience afin d'évaluer l'efficience des systèmes céréales, notamment le blé dur, et les possibilités d'augmenter la production de blé dur en Méditerranée tout en respectant l'environnement.

Cette thèse a été rédigée pour l'essentiel en français sauf le chapitre 5 qui a fait l'objet d'une publication scientifique qui a été soumis. Les deux premiers chapitres sont des chapitres introductifs de la situation des céréales en Tunisie et de l'efficience des ressources, avec un chapitre 1 qui a été rédigé dans la perspective d'une publication scientifique. Le chapitre 4 explique l'élaboration d'un cadre d'analyse qui a été appliqué dans le chapitre 5. Cela amène à des répétitions en particulier lorsqu'il s'agit de la démarche de l'élaboration de cadre.

Cette thèse s'inscrit dans le champ des sciences agronomiques et des systèmes de culture innovants. Or l'Agronomie est une discipline très vaste qui fait aussi appel à de multiples autres disciplines comme la Modélisation, et les Statistiques, pour n'en nommer que quelques-unes. Notre background d'origine est celui d'un ingénieur agronome qui a travaillé sur des problématiques touchant à la fois et l'agronomie et les ressources naturelles, et notre travail s'inscrit volontairement dans une perspective pluridisciplinaire; nous mettons également nos travaux en perspective à l'aide de concepts qui ont pour origine l'écologie et en utilisant des modèles mathématiques. Nous invitons donc le lecteur spécialiste d'une discipline particulière à considérer notre travail dans cette perspective de pluridisciplinarité qui combine l'Economie, l'Agronomie et l'Ecologie avec des outils de programmation mathématique.

Cette thèse résulte de quatre ans de travail au sein de l'UMR SYSTEM (INRA-SupAgro-CIRAD) et du Laboratoire d'Accueil Méditerranéen en Economie et Sciences Sociales (LAMES, CIHEAM-IAMM). Ce Travail de recherche a été dirigé par Jacques WERY (Professeur d'agronomie à Montpellier SupAgro, France), co-encadré par Hatem BELHOUCLETTE (Enseignant chercheur à l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier, France) et Insaf MEKKI (Chercheur à l'INRGREF, Tunisie) et suivi par un comité scientifique composé par les membres suivants : Jacques WÉRY (Montpellier SupAgro, UMR System), Hatem BELHOUCLETTE (IAMM), Karim BARKAOUI (CIRAD, UMR System), Lydie GUILIONI (Montpellier SupAgro, BE), Hélène MARROU (Montpellier SupAgro, UMR System).

Résumé

La faible efficience des ressources non renouvelables comme l'eau et l'azote, constitue un frein à un accroissement durable de la production des céréales. L'augmentation simultanée de l'efficience de l'utilisation de ces deux facteurs et des rendements constitue un défi majeur pour la production céréalière en méditerrané, principalement la production de blé dur. L'objectif de la thèse est d'analyser la variabilité des rendements de blé dur en Tunisie vis-à-vis des deux facteurs de production l'eau et l'azote et les possibilités d'augmenter conjointement la productivité et l'efficience dans les systèmes de culture à base de blé dur. Cette étude s'appuie sur des données expérimentales, de statistiques régionales et d'enquêtes entreprises auprès des agriculteurs sur 537 situations agronomiques (la combinaison d'une parcelle de blé dur, une année et un précédent cultural) de blé dur dans 4 régions qui fournissent une partie importante de la production céréalière. Les données collectées nous ont permis d'établir un cadre d'analyse des compromis entre l'efficience de l'utilisation de la ressource (eau et azote) et le rendement, en se basant sur l'approche de la décomposition de l'efficience et les concepts de facteur limitant, de frontière d'éco-efficience et d'écart de rendement. Testé avec des données expérimentales et appliqué sur les données d'agriculteurs, pour le cas de l'azote, ce cadre a démontré qu'avec un précédent non céréalière, particulièrement des légumineuses, on peut obtenir un potentiel d'absorption d'azote beaucoup plus élevé qu'en monoculture. Les précédents culturaux diversifiés ont permis aussi d'augmenter simultanément la production et l'efficience de l'utilisation d'azote. En revanche, l'augmentation de la frontière d'efficience de la captation d'azote a été marquée par un accroissement des écarts d'absorption à cette frontière, indiquant un effet plus marqué des autres facteurs limitants dans le cas de rotations diversifiées. L'eau et ses interactions avec l'azote pourraient être considérées parmi les principaux facteurs qui peuvent affecter l'absorption azotée et par conséquent les rendements de blé dur. Ce travail permettrait de combiner d'une part le diagnostic des facteurs limitant la production au niveau des parcelles d'agriculteurs et d'autre part l'analyse des scénarios de gestion des compromis production efficience avec les agriculteurs et les décideurs.

Mots clés : *Efficience, blé dur, eau, azote, production, Méditerrané.*

Abstract

The low efficiency of non-renewable resources such as water and nitrogen is a constraint for a sustained increase in cereal production. The simultaneous increase in water and nitrogen use efficiency and yields is a major challenge for cereal production in the Mediterranean, mainly for durum wheat production. The aim of the thesis is to analyze the variability of durum yields in Tunisia with respect to the two factors of production water and nitrogen and the opportunities of jointly increasing productivity and efficiency in a durum wheat-based cropping systems. This study is based on experimental data, regional statistics and farm surveys conducted on a sample of 537 agronomic situations (the combination of a farmer's field, a year and a previous crop) which are representative of the diversity of farmers' practices in four grain-producing regions that provide a major part of cereal production. Based on the efficiency decomposition approach and the concepts of limiting factor, eco-efficiency frontier and yield gap, data collected allowed us to establish a framework allowing to analyze trade-offs between the resource (water and nitrogen) use efficiency and yield. Tested with experimental data and applied to farmers' data for the case of nitrogen, this framework demonstrated that non-cereal preceding crops, especially legumes, result in a higher potential for N uptake by durum wheat than with a monoculture. Diversified rotations result also to an increase in both yield and N-use efficiency of the following durum wheat. The increase in the efficiency frontier of nitrogen capture is partly of-set by increased N uptake gaps in farmers' fields indicating the presence of other limiting factors. Water and its interactions with nitrogen could be considered among the main factors that may affect nitrogen uptake and hence yields of durum wheat. This work would allow combining, on the one hand, the diagnosis of limiting factors at the level of farmer's fields and on the other hand the analysis of scenarios for the management of trade-offs between production efficiency with farmers and decision-makers.

Keywords: *Efficiency, durum wheat, water, nitrogen, production, Mediterranean.*

Table des matières

Remerciements	i
Avant-propos	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Liste des figures	I
Liste des tableaux	V
Liste des abréviations	VII
Introduction générale	1
Chapitre 1 : La variabilité interannuelle et régionale de la production céréalière en Tunisie	3
Objectifs du chapitre	3
1. Les céréales en Tunisie	3
1.1. Utilisation des céréales	3
1.2. Evolution de la production céréalière en Tunisie	5
1.3. Evolution des superficies céréalières semées	8
1.3.1. Variabilité interannuelle des superficies céréalières semées	8
1.3.2. Variabilité régionale des superficies céréalières conduites en pluvial	9
1.3.3. Variabilité régionale des superficies céréalières irriguées	12
1.4. Evolution du ratio des superficies récoltées sur les superficies semées	14
1.5. Evolution des rendements céréaliers	17
1.5.1. Variabilité interannuelle des rendements céréaliers	17
1.5.2. Variabilité régionale des rendements des céréales conduites en pluvial	18
1.5.3. Variabilité régionale des rendements des céréales conduites en irrigué	20
2. Analyse des déterminants de la production céréalière tunisienne	22
2.1. Analyse de la variabilité de production des céréales conduites en pluvial	23
2.2. Analyse de la variabilité de production des céréales conduites en irrigué	26
Conclusion du chapitre	28
Chapitre 2 : Le blé dur dans le nexus alimentation-eau-azote : Problématique et démarche de la thèse	29
Objectifs du chapitre	29
1. Efficience de l'eau et de l'azote pour la production de blé dur en Tunisie	29
1.1. Le blé dur dans le nexus rendement, eau et azote	29
1.2. Relation entre la production de blé dur et l'efficience des apports azotés	31

1.2.1.	Effizienz des apports azotés dans les systèmes céréaliers à base de blé dur _____	31
1.2.2.	Relation entre la production du blé dur et l'efficacité des apports azotés _____	33
1.3.	Relation entre la production du blé dur et l'efficacité des apports hydriques _____	34
1.3.1.	Effizienz de l'eau _____	34
1.3.2.	Relation entre la production du blé dur et l'efficacité de l'eau _____	38
2.	Problématique de la thèse et hypothèses scientifiques _____	39
3.	Stratégie de recherche _____	41
Chapitre 3 : Les données collectées _____		44
Objectifs du chapitre _____		44
1.	Données collectées à l'échelle nationale et régionale _____	44
1.1.	Statistiques nationales et régionales _____	44
1.2.	Données climatiques _____	44
2.	Données collectées à l'échelle de la parcelle _____	45
2.1.	Données collectées auprès des agriculteurs _____	45
2.2.	Données expérimentales issues d'un essai variétal mis en place à Mauguio _____	50
2.3.	Données collectées dans la bibliographie _____	52
Chapitre 4 : Cadre d'analyse des compromis entre l'efficacité des intrants et la production : cas de l'azote dans un système céréaliier méditerranéen _____		54
Objectifs du chapitre _____		54
1.	Cadre théorique _____	54
2.	Elaboration d'un cadre d'analyse applicable dans les conditions d'un réseau de parcelles d'agriculteurs _____	56
3.	Etablissement des courbes enveloppes dans chaque quadrant du cadre d'analyse _____	56
4.	Estimation des paramètres des frontières d'efficacité _____	58
5.	Test du cadre d'analyse sur des parcelles expérimentales en Syrie (ICARDA) _____	59
5.1.	Analyse de l'efficacité de la captation et de la conversion de l'azote _____	59
5.2.	Compromis entre les rendements en grains et l'efficacité de l'utilisation de l'N _____	62
5.3.	Analyse de scénarios pour une réflexion stratégique sur les systèmes de culture _____	64
Conclusion du chapitre _____		66
Chapter 5: Trade-offs analysis between Productivity and Input efficiency: a case study on Nitrogen fertilization on Durum wheat in Mediterranean conditions _____		67
Objectifs du chapitre _____		67
Abstract _____		67
1.	Introduction _____	68
2.	Material and Methods _____	70

2.1.	The four quadrants diagram: a framework to work in farmer's fields	70
2.2.	Data sets	72
2.3.	Calculated variables for the use of Tunisian data	74
2.4.	Determination of boundary curve parameters for wheat in different cropping systems	77
3.	Results	78
3.1.	Test of boundary curves shape on experimental fields in Syria (ICARDA)	78
3.2.	Effect of diversified rotations on wheat N uptake in Tunisian farmer's fields	81
3.3.	Nitrogen uptake gap	82
3.4.	Trade-off analysis between N input efficiency and grain productivity	83
4.	Discussion	84
4.1.	A data-parsimonious functional analysis of previous crop effect on N use efficiency across farmers' fields	84
4.2.	Variability of nitrogen uptake gap in durum wheat in Tunisia	85
4.3.	Towards the Design of sustainable cropping systems	86
5.	Conclusion	86
Chapitre 6 : Relation entre la production du blé dur en Tunisie et l'efficience de l'eau		88
Objectifs du chapitre		88
1.	Cadre conceptuel	88
1.1.	Analyse de la réponse du blé dur à l'eau	89
1.2.	Formalisation du cadre d'analyse de l'efficience de captation et de conversion de la ressource	91
2.	Modèle d'estimation de la transpiration	94
2.1.	Paramétrage du modèle	95
2.2.	Calcul de la transpiration	97
2.3.	Evaluation du modèle	97
2.4.	Premiers résultats	99
3.	Analyse de l'interaction eau/azote pour la production de blé dur	100
3.1.	Analyse des réponses à l'azote en fonction du régime hydrique	101
3.2.	Analyse des écarts de rendements	103
Conclusion du chapitre		107
Chapitre 7 : Discussion et perspectives		108
1.	Résumé des principaux résultats	108
1.1.	Les connaissances sur les facteurs limitant la production céréalière en Tunisie	108
1.2.	Démarche d'analyse des relations efficience et productivité	109

1.3. Résultats du cadre d'analyse de l'efficience de l'azote et de l'eau	111
2. Travaux complémentaires à réaliser	113
2.1. Collecte de données	113
2.1.1. Azote	113
2.1.2. Eau	114
2.1.3. Autres facteurs limitants	115
2.2. Cadre d'analyse des compromis entre la production et l'efficience de l'eau	116
2.3. Analyse de l'effet de l'interaction entre l'eau et l'azote sur la production et l'efficience de ces deux ressources	116
3. Leviers d'action pour améliorer la production du blé dur et l'efficience de l'azote et de l'eau	117
Références bibliographiques	121
Annexes	128
Annexe 1. Données sur les céréales en Tunisie (DGPA, 2014)	129
Annexe 2. Données agriculteurs	131
Annexe 3. Questionnaire d'enquêtes auprès des producteurs de blé dur	133
Annexe 4. Protocole d'expérimentation sur quatre variétés Tunisiennes de blé dur	136
Annexe 5. Données ICARDA-Tel Hadya	139
Les rendements en grains de blé dur soumis à quatre traitements azotés et cultivé dans sept types de rotation biannuelle, à Tel Hadya, Syrie (ICARDA)	139
Annexe 6. Calcul de la production des grains et des protéines et des apports azotés avec différents scénarios dans une exploitation de cinquante hectares en rotation triennale, dans des conditions méditerranéennes	141
Annexe 7. Calcul de VPD	142
Annexe 8. Paramètres « Location » du modèle SSM-wheat	144
Annexe 9. Paramètres « Management » du modèle SSM-wheat	144
Annexe 10. Paramètres « SOIL » du modèle SSM-wheat	145
Annexe 11. Paramètres « CROP » du modèle SSM-wheat	146
Annexe 12. Système d'équations pour le calcul de la photopériode pour le modèle SSM-wheat	148

Liste des figures

Figure 1. Evolution de la production totale de céréales (a) et des trois principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge de 1980 à 2013 (b)	6
Figure 2. Evolution de la production, des importations, des exportations et de la consommation des trois principales céréales (blé dur, blé tendre et orge) (FAO, 2013)	7
Figure 3. Evolution des superficies semées totales (a) et des trois principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge (b) de 1980 à 2013	9
Figure 4. Carte des étages bioclimatiques de la Tunisie (Selmi, 2016)	10
Figure 5. Evolution des superficies semées des céréales conduites en pluvial entre 1980 et 2012 par région (Nord, Centre et Sud)	10
Figure 6. Evolution des superficies semées des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en pluvial dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1980 et 2012	11
Figure 7. Relation entre les pluies automnales (de Septembre à Décembre) et les superficies semées dans une région du Nord sub-humide (Jendouba) et une région du Centre (Kairouan) appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur, pour les années (1989-1994 et 2002-2009)	12
Figure 8. Moyenne des superficies céréalières irriguées dans le Nord, le Centre et le Sud de la Tunisie entre 2001 et 2012	13
Figure 9. Evolution des superficies semées des principaux céréales conduites en irrigué : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (c) et pourcentage des superficies irriguées par rapport aux superficies totales de chaque culture dans les régions du Nord (b) et les régions du Centre et de Sud (d) entre 1980 et 2012	14
Figure 10. Evolution du ratio des superficies récoltées et des superficies semées des trois principales céréales cultivées en Tunisie : Blé dur (BD), Blé tendre (BT) et Orge entre 1980 et 2013	15
Figure 11. Evolution du ratio des superficies récoltées et des superficies semées des céréales conduites en pluvial dans les régions du Nord et du Centre et de Sud entre 1980 et 2013	16
Figure 12. Relation entre les pluies de printemps (d'Avril à Juin) et le ratio des superficies récoltées sur les superficies semées dans une région du Nord sub-humide (Jendouba) et une région du Centre semi-aride (Kairouan), pour les années (1989-1995 et 2002-2009)	17
Figure 13. Evolution des rendements des trois principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge de 1980 à 2013	18
Figure 14. Evolution des rendements des céréales conduites en pluvial entre 1980 et 2012 par région (Nord, Centre et Sud)	19
Figure 15. Evolution des rendements des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en pluvial dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1980 et 2012	20

Figure 16. Evolution des rendements des céréales conduites en pluvial et en irrigué entre 1999 et 2012 (a) et variation des rendements des principaux céréales conduites en irrigué : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge entre 1999 et 2013 _____	21
Figure 17. Evolution des rendements des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en irrigué dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1999 et 2013 _____	22
Figure 18. Relation entre la production et les superficies semées des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en pluvial dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1980 et 2012 _____	23
Figure 19. Relation entre la production et le ratio des superficies récoltées et des superficies semées des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en pluvial dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1980 et 2012 _____	24
Figure 20. Relation entre la production et les rendements des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en pluvial dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1980 et 2012 _____	25
Figure 21. Relation entre la production et les superficies semées des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en irrigué dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 2001 et 2012 _____	26
Figure 22. Relation entre la production et les rendements des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en irrigué dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1999 et 2013 _____	27
Figure 23. Evolution des apports d'engrais pour la production du blé dur (a) et des rendements de blé dur en Tunisie et (b) entre 1981 et 2013 _____	32
Figure 24. Evolution de l'efficacité de l'azote apporté pour la production du blé dur en Tunisie entre 1981 et 2013 _____	33
Figure 25. Evolution interannuelle des rendements moyens des céréales (a) et de l'efficacité des apports azotés pour la production des céréales dans le monde (b) (Tilman et al, 2002) _____	33
Figure 26. Variabilité des rendements de blé dur et de l'efficacité de l'azote apporté entre 1981 et 2013 (a) et relation rendement-efficacité (b) _____	34
Figure 27. Représentation schématique du rendement du blé par rapport à l'approvisionnement saisonnier en eau (Précipitations pendant la saison de croissance plus l'eau disponible dans le sol au moment du semis). (Passioura et Angus, 2010) _____	35
Figure 28. Evolution des pluviométries annuelles durant les années agricoles (Septembre-Aout) 1996/1997-2011/2012 (a) et répartition des pluies mensuelles moyennes calculées sur la période de 2002-2013 (b), pour les trois régions de Béja, Siliana et Sidi Bouzid _____	36
Figure 29. Relation entre les pluies et les rendements de blé dur cultivé en pluvial dans les régions de Béja, Siliana et Sidi Bouzid (a) et variabilité de l'efficacité de l'eau de pluie dans les régions de Béja et Siliana (b) pour la période comprise entre Septembre et Juin pour les années de 2003 à 2012 ____	37

Figure 30. Relation entre les rendements du blé dur et l'efficacité de l'eau de pluie pour la période comprise entre Septembre et Juin pour les années 2003 à 2012	38
Figure 31. Schéma récapitulatif de la démarche globale	43
Figure 32. Carte de découpage en gouvernorats de la Tunisie	45
Figure 33. Présentation des quatre régions céréalières : Jendouba, Siliana, Kairouan et le bassin versant de Lebna et de leurs étages bioclimatiques	46
Figure 34. Dispositif expérimental réalisé sur quatre variétés Tunisiennes de Blé dur	50
Figure 35. Fonctions de production et frontière d'éco-efficacité	55
Figure 36. Cadre d'analyse à quatre quadrants établi avec les données des expérimentations réalisées à la station de l'ICARDA au nord de la Syrie, permettant de comparer des mesures réels à des courbes enveloppes mettant en relation la captation de la ressource (a), la conversion de la ressource (b) et les compromis entre l'efficacité de l'intrant et les rendements (c)/les intrants (d)	60
Figure 37. Cadre d'analyse à quatre quadrants permettant d'analyser des études de cas (points A, B et C) et proposer des voies d'amélioration des compromis entre l'efficacité de l'intrant et les rendements (c)/les intrants (d), en se basant sur les courbes enveloppes	64
Figure 38. Conceptual framework based on concepts of limiting factors (a), yield gap (b), eco-efficiency frontier (c) and decomposition of resource efficiency (d) allowing to analyze the efficiency of resource capture and conversion and to design cropping systems based on trade-offs between efficiency and performances or inputs. Y_a and Y_{max} are the achievable and the potential (maximum) performance respectively when the resource in the x axis (N supply) is not limiting for plant growth. A and B are the same crop in different crop rotations.	71
Figure 39. Simulated versus measured N uptake by durum wheat in ICARDA's experimental station	77
Figure 40. Four-quadrant diagram based on experimental data in ICARDA's experimental station, showing individual field measurements and boundary curves of the relationship between (a) nitrogen applied and nitrogen uptake, (b) nitrogen uptake and grain yield, (c) grain yield and nitrogen efficiency and (d) nitrogen efficiency and nitrogen supply for each previous crop in the rotation: Fallow, Watermelon, Legumes, Chickpea and Wheat	80
Figure 41. Four-quadrant diagram based on data collected across farmers' fields in Northern Tunisia showing the relationship between: nitrogen supply and nitrogen uptake (a), nitrogen uptake and grain yield (b), grain yield and nitrogen efficiency (c) and nitrogen efficiency and nitrogen supply (d) for each previous crop in the rotation: Cereals, Vegetables, Legumes and Chickpea	82
Figure 42. Frequency distribution for the relative gap of nitrogen uptake for each previous crop in the rotation: Cereals, Vegetables, Legumes and Chickpea	83
Figure 43. Relations entre les rendements du blé dur irrigué et la quantité d'eau disponible (P+I) comparées à une courbe enveloppe globale (a) et des courbes enveloppes en fonction des différents précédents culturels (b) : céréales (CE) (I) et d'autres cultures de diversification (II) comme les légumineuses (LG), les cultures maraîchères (CM) et la betterave sucrière (BS).	91

Figure 44. Courbes enveloppe théoriques obtenues sur le blé dur en Tunisie en séparant l'efficacité de la captation (a) et de la conversion (b) de la ressource hydrique	94
Figure 45. Schéma récapitulatif des entrées et des sorties du modèle SSM-wheat	95
Figure 46. Comparaison des dates des principaux stades phénologiques (a) et de la biomasse en grain et totale (b), simulés par le modèle SSM-wheat, avec des mesures effectuées sur des variétés Tunisiennes de blé dur (Karim, Maali, Nasr et Razzak). (DAS : jours après le semis)	98
Figure 47. Comparaison de l'évolution de la fraction du rayonnement (PAR) simulée par le modèle SSM-wheat, avec des mesures effectuées sur des variétés Tunisiennes de blé dur (Karim, Maali, Nasr et Razzak). (DAS : jours après le semis)	98
Figure 48. Courbes enveloppes obtenues pour quatre variétés Tunisiennes de blé dur cultivées dans un essai expérimental à Montpellier, de l'efficacité de la captation (a) et de la conversion (b) de la ressource hydrique	100
Figure 49. Réponses à l'azote du blé dur conduit en pluvial et en irrigué au niveau des parcelles d'agriculteurs dans quatre régions Tunisiennes (Jendouba, Siliana, Kairouan et le bassin versant de Lebna)	102
Figure 50. Fréquence des écarts de rendement par rapport à la frontière d'efficacité d'azote, du blé dur conduit en pluvial et en irrigué dans quatre régions Tunisiennes (Jendouba, Siliana, Kairouan et le bassin versant de Lebna)	103
Figure 51. Diagramme à deux quadrants mettant en relation l'azote apporté et l'azote absorbé (captation de la ressource, a) et l'azote absorbé et le rendement (conversion de la ressource, b) du blé dur conduit en pluvial et en irrigué dans quatre régions Tunisiennes (Jendouba, Siliana, Kairouan et le bassin versant de Lebna)	105
Figure 52. Relation entre les écarts de rendements à la frontière d'efficacité de l'eau et les apports azotés au blé dur conduit en irrigué dans trois régions Tunisiennes (Jendouba, Siliana, Kairouan)	106
Figure 53. Relation entre les écarts relatifs des réponses à l'eau et les écarts relatifs des réponses à l'azote	106
Figure 54. Cadre d'analyse permettant d'analyser des scénarios et proposer des voies d'amélioration des compromis entre l'efficacité de l'intrant et les rendements (a)/les intrants (b), en se basant sur les courbes enveloppes en fonction des rotations : Blé dur en pluvial après une céréale, Blé dur en pluvial après une légumineuse	119
Figure 55. Relations entre les apports azotés et le potentiel de production annuel moyen sur trois ans pour un blé dur en monoculture (blé-blé-blé) et un blé dur dans une rotation triennale avec une légumineuse (légumineuse-blé-blé) et variabilité de la production de blé dur et des apports azotés entre 1981 et 2012 dans la région de Jendouba	120

Liste des tableaux

Tableau 1. Bilan céréales, Tunisie, 2009 (FAOSTAT, Division de la statistique 2013)	4
Tableau 2. Coefficient de corrélation linéaire mettant en relation la production céréalière en pluvial et ses variables explicatives, p-value calculée à un seuil de confiance de 95 % (test de Pearson), les valeurs en gras correspondent aux variables qui expliquent le mieux la production et les valeurs en italiques correspondent aux corrélations non significatifs	25
Tableau 3. Coefficient de corrélation linéaire mettant en relation la production céréalière en irrigué et ses variables explicatives, p-value calculée à un seuil de confiance de 95 % (test de Pearson), les valeurs en gras correspondent aux variables qui expliquent le mieux la production et les valeurs en italiques correspondent aux corrélations non significatifs	27
Tableau 4. Récapitulatif des données collectées sur des parcelles de blé dur	48
Tableau 5. Moyennes des biomasses (en matière sèche, MS) en grains et en pailles, des teneurs en azotes des grains (Ng) et des pailles (Np) et des indices de récolte correspondants (HI et HIN) pour les quatre variétés Tunisiennes de blé dur cultivées à Mauguio	51
Tableau 6. Données expérimentales publiées issues des expérimentations réalisées à la station de l'ICARDA à Tel Hadya	52
Tableau 7. Données bibliographiques	53
Tableau 8. Moyennes des biomasses (MS) en grains et en pailles, des teneurs en azote des grains (Ng) et des pailles (Np) et des indices de récolte correspondants (HI et HIN) pour les quatre variétés Tunisiennes de blé dur cultivées à Mauguio	53
Tableau 9. Paramètres de la frontière d'efficacité de la captation d'N et critère d'information d'Akaike (AIC) permettant de comparer le modèle simple (nls) et le modèle spécifique (gnls) pour tester la courbe de chaque rotation à la courbe la plus élevée. Le p-value détermine la différence significative entre la courbe de chaque rotation et la courbe supérieure	61
Tableau 10. Paramètres de la frontière d'efficacité de la conversion d'N et critère d'information d'Akaike (AIC) permettant de comparer le modèle simple (nls) et le modèle spécifique (gnls) pour tester la courbe de chaque rotation à la courbe la plus élevée. Le p- value détermine la différence significative entre la courbe de chaque rotation et la courbe supérieure	62
Tableau 11. Comparaison de deux modèles permettant d'établir les courbes enveloppes de la conversion de la ressource en se basant sur le critère d'information d'Akaike (AIC) et la somme résiduelle des carrés (RSS)	62
Tableau 12. Valeurs maximales observées pour le rendement (Ymax) et l'efficacité d'utilisation d'N (Emax) pour chaque traitement (traitements azotés et rotation)	63
Tableau 13. Valeurs moyennes annuelles des apports azotés par hectare (N), de la production alimentaire totale et de l'efficacité de l'utilisation d'N (E) obtenus dans une exploitation de cinquante hectares en rotation triennale, avec différents scénarios de système de culture	66

Table 14. Agronomic situations surveyed in Durum wheat in Tunisia _____	74
Table 15. Soil Organic Matter content (%) across the previous crop _____	74
Table 16. Bibliographic data _____	75
Table 17. Average of dry matter, nitrogen concentration in grain and straw and harvest index in bibliographic and experimental data on the four Tunisian varieties _____	76
Table 18. Boundary curve parameters of the relationship between N uptake and N-input in ICARDA's experimental station, as well as Akaike criterions (AIC) of a simple model (nls) and complex model (gnls) testing differences between boundary curve of each rotation and the highest boundary curve. P-value stands for the test of adjustment for one specific rotation being significantly different from the highest boundary line _____	79
Table 19. Comparison of models used to establish boundary curves of the relationship between N uptake and yield for each rotation based on Akaike criterion (AIC) and residual sum of squares (RSS) _____	80
Table 20. Boundary curve parameters of the relationship between N uptake and N-input in farmers' fields and Akaike criterion (AIC) comparing a simple model (nls) and complex model (gnls) testing differences between boundary curve of each rotation and the highest boundary curve. P-value stands for the test of adjustment for one specific rotation being significantly different from the highest boundary line. _____	81
Tableau 21. Coefficient de transpiration pour différentes cultures (Soltani et Sinclair, 2012) _____	93
Tableau 22. Nombre de traitement des résultats des simulations des variables permettant d'établir le cadre d'analyse (P+I, rendements en grains et transpiration) _____	99
Tableau 23. Paramètres de la frontière d'efficience et critère d'information d'Akaike (AIC) permettant de comparer la courbe de chaque mode de conduite (en pluvial, en irrigué) à la courbe la plus élevée _____	102

Liste des abréviations

ALMIRA : Landscape Mosaics And Agrosystem Service

AIC: Critère d'Information d'Akaike

BD : Blé Dur

BD_1 : Base de Données

BS : Betterave Sucrière

BT : Blé Tendre

CE : Céréales

CM : Culture Maraichères

DAP : Diammonium Phosphate

DDMP : Production journalière de matière sèche

DGPA : Direction générale de la production agricole

DRAINF : facteur de drainage

DUL: Drained Upper Limit

EXTR : Volume d'eau pouvant être extrait par la plante

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

FG : charge caillouteuse

FMIN : Fraction d'azote organique disponible pour la minéralisation

HI : Indice de récolte

I : Quantité d'eau apporté par l'irrigation

ICARDA: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas

INAT : Institut National Agronomique de Tunisie

INGC : Institut National de Grandes Cultures, Tunisie

INM : Institut National de Météorologie, Tunisie

K : Coefficient de transpiration

LG : Légumineuses

MAI : Profil de sol entier

N : Azote

Na : Azote absorbé atteignable

Nmax : Azote absorbé maximal

NORG : Quantité d'azote organique dans la couche supérieure du sol

ONAGRI : Observatoire National de l'Agriculture, Tunisie

P : Quantité de pluie

PAR : Fraction du rayonnement intercepté

PC : Précédent Cultural

PIB : Produit Intérieur Brut

RIE : Efficience du rayonnement intercepté

SAT : humidité volumique à la saturation

T : Transpiration (mm)

t/ha : tonnes par hectare

TBD : Température de base

TCD : Température maximale

TP1D : Température optimale

VPD : Pression de vapeur d'eau saturante

VPTMAX : Vapeur de saturation calculée à des températures journalières maximales

VPTMIN : Vapeur de saturation calculée à des températures journalières minimales

Y : Rendement

Ymax : Rendement potentiel

Introduction générale

Les céréales ont une large aire d'adaptation géographique et elles contribuent largement à l'alimentation humaine et animale. En effet, le maïs, le riz et le blé fournissent plus de 60 % des besoins de la population en calories (Cassman et al, 2002). Le blé dur se distingue du blé tendre par la composition protéique de ses grains qui lui confère des qualités technologiques adaptées pour la transformation en pâtes alimentaires et en semoule. C'est ainsi la seule céréale cultivée en grande culture, destinée uniquement à l'alimentation humaine. La culture de blé dur dans le monde est concentrée dans le Centre Est Asiatique, l'Amérique du Nord, l'Inde et le bassin méditerranéen qui fournit 60 % de la production mondiale (Abad et al, 2004). Ces régions méditerranéennes, particulièrement le Maghreb et l'Italie, constituent aussi la principale zone de consommation de blé dur qui est inclus dans la plupart des plats et des produits alimentaires (couscous, pâtes,...). En revanche, la production de blé dur dans la plupart des pays méditerranéens, demeure nettement en deçà de la demande croissante de la population qui est dû à l'accroissement de la population et au changement des modes alimentaires (Cheriet, 2013). En Tunisie, la production de blé dur est caractérisée par une variabilité interannuelle importante généralement expliquée par la variabilité des superficies et des rendements qui sont fréquemment soumis à des pluies saisonnières insuffisantes et irrégulières (Bachta, 2011). Cette variabilité cache une variabilité entre les régions, les exploitations agricoles ou entre des parcelles au sein de la même exploitation. Elle pourrait être expliquée par la variabilité des conditions pédoclimatiques, des apports hydriques (pluies et irrigation), des apports en nutriments et d'autres pratiques culturales (date de semis, rotation, protection phytosanitaire, fertilisation...etc). Néanmoins, malgré la variabilité des facteurs cités précédemment, l'eau et l'azote demeurent les principaux facteurs limitant la production de blé dur en Tunisie (Latiri et al, 1998 ; Latiri et al, 2010).

En Tunisie, l'accroissement des rendements de blé dur par l'irrigation de complément et par des apports d'engrais azotés fractionnés a été démontré. Toutes ces pratiques engendrent un coût de production élevé et des risques de pollution de l'environnement (Guarda et al, 2004). Néanmoins, des hauts rendements atteignant les maxima ne sont pas associés à une forte efficacité d'utilisation de l'eau et de l'azote. L'amélioration de ces efficacités pourrait être obtenue par des pratiques agricoles permettant d'accroître le potentiel de rendement en levant d'autres facteurs limitants, d'augmenter l'absorption d'azote et/ou sa conversion en grains par la plante et de réduire les émissions d'azote vers l'air ou l'eau. Ces attributs définissent une agriculture éco-efficace (Keating et al, 2010) qui postule la possibilité d'augmenter

conjointement la production et l'efficacité de la ressource en adoptant de nouvelles technologies qui améliorent l'adaptation d'une culture aux différents stress biotiques et abiotiques. Ceci permettrait de s'engager dans une agriculture éco-efficace permettant une production de blé dur écologiquement et économiquement efficace. Elles peuvent être inspirées des activités paysannes anciennes, ou innovantes dans la gestion de l'irrigation et de la fertilisation et dans l'amélioration génétique (Keating et al, 2010).

Dans cet objectif nous avons initié cette étude sur les perspectives d'utilisation d'un cadre de décomposition des efficacités, pour tester l'hypothèse de l'éco-efficacité sur le blé dur en Tunisie, en commençant par l'eau et l'azote. Ce cadre vise à analyser l'effet des rotations, en tant que diversification temporelle de la structure du système de culture, sur le compromis entre la production et l'efficacité des ressources.

Cette thèse menée au sein de l'UMR System- Montpellier Sup Agro, s'inscrit également comme une première étape d'une collaboration scientifique établie avec l'Institut National des Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF) et l'IAM de Montpellier sur « l'analyse et la conception de systèmes de culture durables à base de blé dur en zone méditerranéenne ». La thèse a été financée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de la Tunisie, par l'Institut National des Recherches en Génie Rural Eaux et Forêts – Tunisie (INRGREF) et par l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier – France (CIHEAM-IAMM)

Les deux premiers chapitres décrivent le contexte général de la production céréalière en Tunisie (blé tendre, blé dur et orge) et analyse, à partir des statistiques nationales et régionales les déterminants de la quantité produite annuellement. Suite à une description de la situation du blé dur dans le nexus alimentation-eau-azote, on en déduit les objectifs de la thèse, les hypothèses et la démarche globale. Le chapitre 3 est consacré à la description détaillée des données collectées tout au long de la thèse. Le chapitre 4 porte sur l'élaboration du cadre d'analyse des efficacités de captation et de conversion de la ressource et des compromis entre la production et l'efficacité. Ce cadre d'analyse a été testé pour l'azote avec des données expérimentales en Syrie et appliqué sur les données d'agriculteurs en Tunisie dans le chapitre 5. Le chapitre 6 présente une première tentative d'extension du cadre d'analyse à une autre ressource (l'eau) et à l'étude de ses interactions avec l'azote. Le dernier chapitre est consacré à la discussion générale de la thèse qui présente une synthèse des résultats, les limites des approches et des méthodes utilisées et les perspectives possibles qu'ouvre ce travail.

Chapitre 1 : La variabilité interannuelle et régionale de la production céréalière en Tunisie

Objectifs du chapitre

Ce premier chapitre vise à exposer la situation de la production céréalière et de ses déterminants dans un contexte méditerranéen, particulièrement en Tunisie. En se basant sur les statistiques nationales et régionales de la production céréalière en Tunisie, obtenues auprès de la direction générale de la production agricole (DGPA, Ministère de l'agriculture, des ressources hydrauliques et de la pêche, Tunisie) (1.1, Chapitre 3), nous avons analysé la variabilité interannuelle de la production des trois principales céréales (blé dur, blé tendre et orge) en Tunisie et de leurs relations avec les rendements et les superficies en fonction du mode de conduite et l'emplacement géographique.

1. Les céréales en Tunisie

Les céréales jouent un rôle central dans la disponibilité alimentaire du Maghreb et au Moyen-Orient, même si leur part dans la disponibilité régionale en produits végétaux a baissé de 65 à 60 % au cours de la période 1960-2010 (Le Mouël et al, 2015). Les disponibilités en céréales (ou consommation apparente théorique) s'élevaient en 2009 à 230 kg par habitant en Algérie (dont 87% sous forme de blé) contre 206 en Tunisie et 175 au Maroc (Rastoin et Ben Abderrazik, 2014). Ce maintien à un niveau élevé de la part des céréales dans l'alimentation de la région s'explique principalement par les traditions culinaires de la région, favorisant les aliments à base céréalière (CIHEAM, 2012), qui ont été encouragées par les politiques de maintien de prix à la consommation bas pour les produits dits de première nécessité et renforcées par les faibles revenus d'une partie des consommateurs (Le Mouël et al, 2015).

1.1. Utilisation des céréales

Le blé est la céréale la plus consommée, représentant, suivant les périodes, entre 40 et 50 % de la disponibilité alimentaire végétale de la région. Les « autres céréales » (orge et avoine, notamment) dont la place est particulièrement prégnante au début des années 1960, voient leur part se réduire considérablement au point d'être supplantées, dès les années 1980, par le riz et le maïs au Moyen Orient et par le maïs et le blé tendre au Maghreb (Le Mouël et al, 2015).

Au niveau de la région Maghreb/Moyen-Orient, l'alimentation animale reposait, au début des années 1960, principalement sur l'avoine et l'orge (70% des céréales utilisées), le complément étant fourni en grande partie par le blé et le maïs (soit 10% pour chacune des céréales). Actuellement, c'est le maïs qui remplace l'avoine et l'orge dans la ration, tandis que la part du blé reste aux alentours de 10% des céréales totales apportées (Le Mouél et al, 2015).

En Tunisie, les céréales représentent depuis des millénaires, une activité économique et sociale stratégique, qui occupe une place importante dans la production agricole, l'emploi et l'industrie agroalimentaire (Dhehibi et al, 2012). En effet, les agriculteurs sont habitués à cultiver le blé dur pour leurs besoins en semoule et de l'orge pour assurer en partie, les besoins des animaux. Quant au blé tendre, il n'était pas connu par les céréaliculteurs tunisiens jusqu'à l'introduction de la variété Florence-Aurore par l'Institut National Agronomique de France en 1922 (El Felah et Gharbi, 2014) et ce n'est qu'en 1923 que furent réalisés les premiers croisements pour sélectionner des variétés locales (Deghais et al, 2007).

Les céréales sont les produits de base qui constituent la majeure partie de la ration alimentaire des Tunisiens. Elles assurent 70 % et 55 % de ses besoins alimentaires respectivement en calories et en protéines (Dhehibi et al, 2012). Les produits à base de céréales représentaient, en 2005, 6% des dépenses des ménages, soit 16% des dépenses alimentaires. Le blé dur demeure la base de l'alimentation en Tunisie (semoule et pâtes). On observe cependant une progression rapide du blé tendre (pain, biscuiterie, pâtisserie) avec l'occidentalisation du modèle de consommation. L'orge est destinée principalement à l'alimentation animale, même si des plats traditionnels continuent à l'incorporer (mais d'une façon marginale) (Tableau 1) (Rastoin et Ben Abderrazik, 2014).

Tableau 1. Bilan céréales, Tunisie, 2009 (FAOSTAT, Division de la statistique 2013)

Produit	Milliers de tonnes									Disponibilité alimentaire (kg/personne/an)
	Production	Importations	Variation de Stock	Exportations	Disponibilité intérieure	Aliments pour animaux	Semences	Pertes	Alimentation	
Blé	1654	1240	-200	141	2553	144	53	225	2135	206
Orge	850	80	-	-	930	803	24	18	63	6
Céréales, autres	79	1	-	-	80	67	-	1	10	1
Riz (éq.blanchi)		10	-	-	10			-	9	1
Maïs		674		-	674	665				
Céréales (Total)	2585	2009	-200	142	4253	1680	77	245	2221	214

En plus de l'orge qui occupe la 2^{ème} place après le blé dur en termes de production, les céréales les plus couramment utilisées comme fourrage en Tunisie sont le maïs fourrager, le triticale et l'avoine. La culture du triticale est localisée dans certaines exploitations du nord du pays et ses superficies ne dépassent pas 1% (DGPA, 2014). Quant à la culture d'avoine qui est bien enracinée dans la tradition des petits exploitants, elle est cultivée seule ou mélangée à la vesce pour produire du foin. C'est le fourrage prédominant en Tunisie, qui occupe des superficies quasiment stables d'environ 184 000 ha par an, soit 70 % des superficies annuelles en fourrages (FAO, 2006).

Dans les systèmes céréaliers conduits principalement en pluvial, ces céréales fourragères sont parfois introduites dans des rotations biennales ou triennales avec d'autres céréales ou avec des légumineuses fourragères (Féverole, Luzerne, Vesce, Fenugrec...) ou alimentaires (Pois chiche d'hiver ou de printemps, Lentilles, Fève...) (Chekali et al, 2016). Dans les périmètres irrigués, les cultures maraichères irriguées sont généralement incluses dans la rotation céréalière. Le choix des cultures en rotation est dans ce cas souvent influencé par des politiques nationales. Par exemple, les agriculteurs des périmètres irrigués de la région du Nord-Ouest de la Tunisie sont encouragés à introduire la betterave dans l'assolement, en vue de développer une filière nationale de production de sucre (Abdelkefi, 1995).

En revanche, dans la plupart des régions méditerranéennes, la production de céréales en monoculture est très répandue et les superficies allouées aux céréales en rotation sont beaucoup plus faibles (Montemurroa et Maiorana, 2014). En Tunisie, la production de blé se caractérise par la prédominance de la monoculture qui couvre actuellement plus de 70% des surfaces emblavées en céréales (Mouelhi et al, 2016). Ces pratiques sont de nature à réduire la fertilité des sols notamment au niveau de leur matière organique dans les sols et de leur capacité de rétention en eau (Bouajila et al, 2013).

1.2. Evolution de la production céréalière en Tunisie

La céréaliculture représente 13% de la valeur ajoutée agricole durant la période allant de 2000 à 2010 (Bachta, 2011). En 2012, la contribution de la céréaliculture à la valeur ajoutée agricole et au PIB a respectivement été de 16,47% et de 1,44% (ONAGRI, 2014). Le blé dur, l'orge et le blé tendre sont les principales céréales produites en Tunisie avec une prédominance du blé dur qui est associée en général aux zones semi-arides dont la pluviométrie annuelle moyenne est de 300 à 400 mm (Ben Selem et al, 1995).

La production céréalière à l'échelle du pays est caractérisée par une forte variabilité interannuelle avec une tendance à la hausse très modérée (Figure 1.a) qui ne suffit pas à compenser l'évolution de la demande avec l'accroissement de la population (Dhehibi et al, 2012). Au cours des trois dernières décennies (1980-2013), la production céréalière de la Tunisie a varié entre un minimum de 290 000 tonnes (en 1988) et un maximum de 2.9 Millions de tonnes en 1996 et en 2003. La moyenne annuelle était, sur cette même période, de 1.5 Millions de tonnes par an (Figure 1.a). En 1988 et 2002 cette production ne couvrait respectivement que 18 et 16% des besoins de la population alors qu'en 1992 et 1996 ces besoins ont été satisfaits à 76% (Figure 2). De ce fait, la Tunisie n'est pas autosuffisante en produits céréaliers et importe presque 50% de ses besoins en blés.

Entre 1980 et 2013, la production de blé dur représentait en moyenne 60% de la production céréalière totale, suivie par l'orge (24%) et le blé tendre (13%) (Figure 1.b). Les taux moyens de couverture des besoins par la production nationale s'élevaient à 72%, 64% et 21% pour le blé dur, l'orge et le blé tendre respectivement. Ces taux sont par ailleurs variables d'une année à l'autre en fonction de la pluviométrie (Bachta el al, 2011).

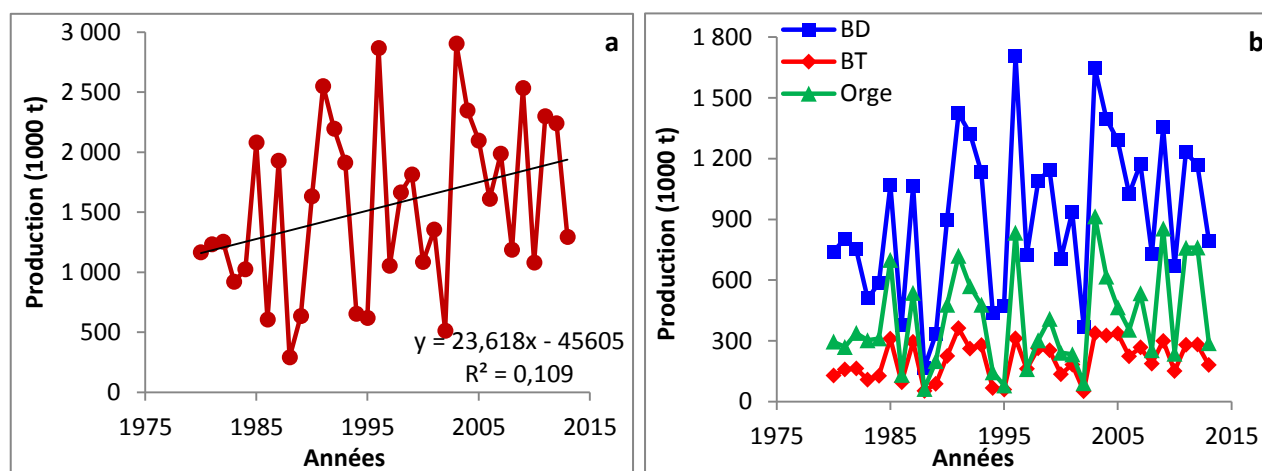


Figure 1. Evolution de la production totale de céréales (a) et des trois principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge de 1980 à 2013 (b)

La Tunisie est donc confrontée à un problème de dépendance extérieure qui s'accompagne de conséquences budgétaires. Les cinq premiers fournisseurs de céréales de la Tunisie assuraient 63% des importations en 2011. Il s'agissait de l'Ukraine (19%), de la Russie (12%), de la France (11%), de l'Italie (11%) et du Brésil (10%). Pour les quatre premiers pays, il s'agit des trois principales céréales blé dur, blé tendre et orge, et pour le Brésil il s'agit du maïs utilisé principalement pour l'alimentation des volailles.

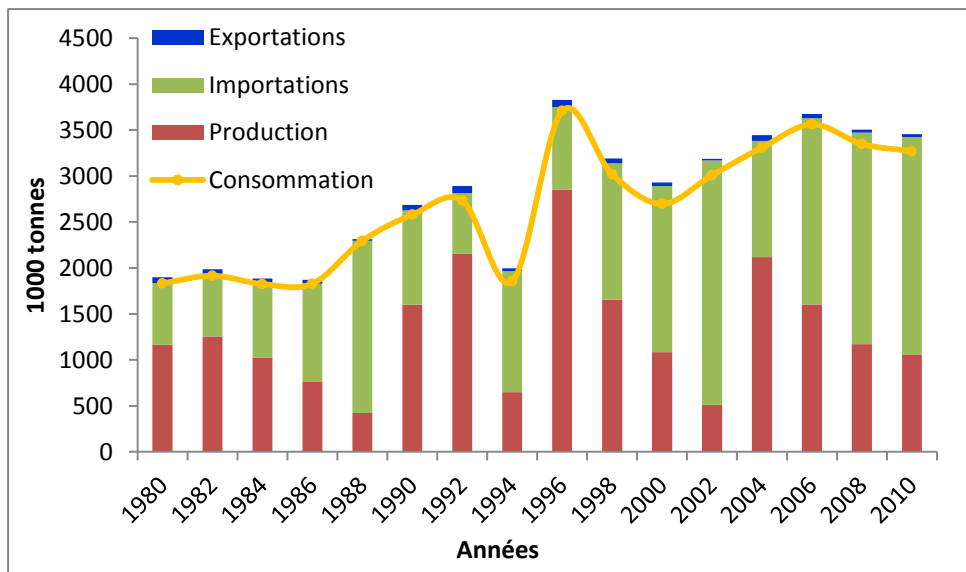


Figure 2. Evolution de la production, des importations, des exportations et de la consommation des trois principales céréales (blé dur, blé tendre et orge) (FAO, 2013)

La production céréalière en Tunisie, étant surtout pluviale, elle reste très sujette aux aléas climatiques qui se traduisent par des fluctuations interannuelles des superficies et des rendements. On peut analyser cette évolution à partir de l'identité (Eq.1) c'est à dire la décomposition d'une performance (ici la production) en composants de base qui reste valable à toutes les échelles depuis la parcelle jusqu'au pays (Porter et Christensen, 2013):

$$\text{Production} \equiv \text{Superficies semées} \times \frac{\text{Superficies récoltées}}{\text{Superficies semées}} \times \frac{\text{Production}}{\text{Superficies récoltées}} \quad (\text{Eq.1})$$

Le dernier terme de l'identité représente le rendement moyen qui au niveau régional et national est dans les statistiques calculé comme le ratio entre la quantité totale de grains produite et la superficie récoltée.

Nous analysons dans les parties suivantes comment chacun des termes de l'identité varie au niveau national puis régional au cours des années pour chacune des trois céréales (blé dur, blé tendre et orge). Nous montrons ensuite comment ils se combinent pour expliquer les évolutions de la production des trois principales céréales cultivées en Tunisie. Pour ce faire, nous avons utilisé une base de données sur les statistiques nationales et régionales de la production céréalière en Tunisie, obtenue auprès de la direction générale de la production agricole (DGPA) au Ministère de l'agriculture, des ressources hydrauliques et de la pêche. Il s'agit de données sur les principales céréales cultivées en Tunisie (Blé dur, Blé tendre et

Orge), conduites en sec (1980-2012) ou en irrigué (1999-2013), qui couvrent des informations sur : les superficies semées, les superficies récoltées, les rendements par rapport à la superficie semée, les rendements par rapport à la superficie récoltée et la production.

1.3. Evolution des superficies céréalières semées

1.3.1. Variabilité interannuelle des superficies céréalières semées

Les céréales sont cultivées en Tunisie sur de grandes superficies essentiellement en pluvial. Elles occupent en moyenne le tiers de la superficie agricole utile (El Felah et al, 2015) avec 1.15 million d'ha en 2013 et une moyenne de 1.5 million d'ha durant les trois dernières décennies (1980-2013) (Figure 3.a). Le blé dur occupe à lui seul, en moyenne 710 000 hectares soit 52% de la superficie totale des céréales. L'orge et le blé tendre représentent respectivement 540 000 ha et 130 000 ha (Figure 3.b). Les superficies céréalières semées connaissent d'importantes fluctuations interannuelles avec une tendance à la baisse au cours des années.

Au cours de ces dernières décennies, ces emblavements céréaliers (superficie semée) ont varié entre 1,15 million d'ha en 2013 et 1,99 millions d'ha en 1996 (Figure 3.a). Cette variabilité des superficies semées par an dans chaque région pourrait être expliquée par l'irrégularité des pluies, particulièrement les pluies d'automne qui constituent un facteur décisif pour déclencher le semis (Latiri et al, 2010). Le blé tendre, cultivé essentiellement dans la région la plus arrosée du pays, connaît le moins de variabilité de surface en comparaison aux autres céréales. En revanche, pour l'orge qui est la céréale principale des zones à pluviométrie faible et variable, les surfaces semées sont plus variables. C'est également le cas du blé dur pratiqué traditionnellement par l'ensemble des céréaliculteurs (Bachta et al, 2011). Cette spécificité, entraîne pour certaines années une diminution des superficies de blé dur et un rapprochement spectaculaire entre les superficies de blé dur (BD) et d'orge, surtout au cours des campagnes agricoles 2011-2012 (BD : 612 000 ha ; Orge : 588 000 ha) et 2013-2014 (BD : 572 000 ha ; Orge : 535 000 ha). A cela il faut rajouter l'effet de la libéralisation du marché de l'orge comparativement à celui des blés et le développement du marché parallèle (El Felah et al, 2015). En revanche, on peut aussi expliquer ce rapprochement par l'encouragement de l'Etat à cultiver l'orge afin de subvenir aux besoins du cheptel dans l'objectif de se rapprocher de l'autosuffisance en viandes et en produits laitiers.

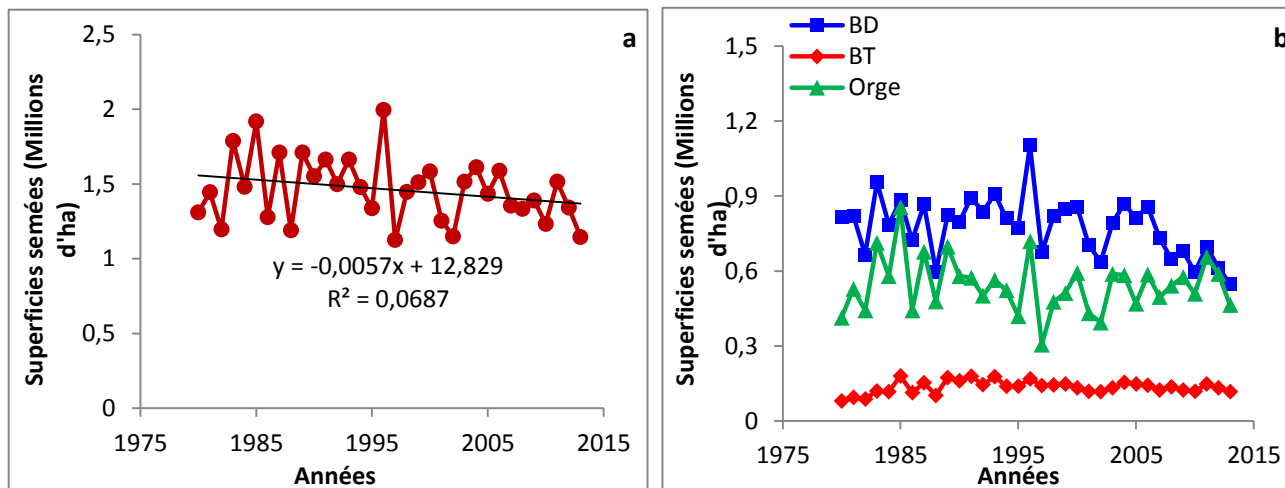


Figure 3. Evolution des superficies semées totales (a) et des trois principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge (b) de 1980 à 2013

1.3.2. Variabilité régionale des superficies céréalières conduites en pluvial

En Tunisie, la majeure partie des superficies céréalières sont conduites en pluvial. Ces superficies se caractérisent par une grande variabilité interannuelle qui cache de fortes différences régionales. En effet, dans la région du Nord, dont quelques gouvernorats appartiennent à l'étage bioclimatique subhumide (Bizerte, Beja, Jendouba) et d'autres appartiennent à l'étage semi-aride supérieur (Kef, Siliana, ...) (Figure 4), les emblavures conduites en pluvial étaient relativement stables entre 1980 et 2012 (Figure 5). Dans les régions du Centre et du Sud, où il y a prépondérance du semi-aride inférieur et de l'aride supérieur (Kairouan, Sidibouza, Kasserine, ...), les superficies emblavées sont très variables entre années.

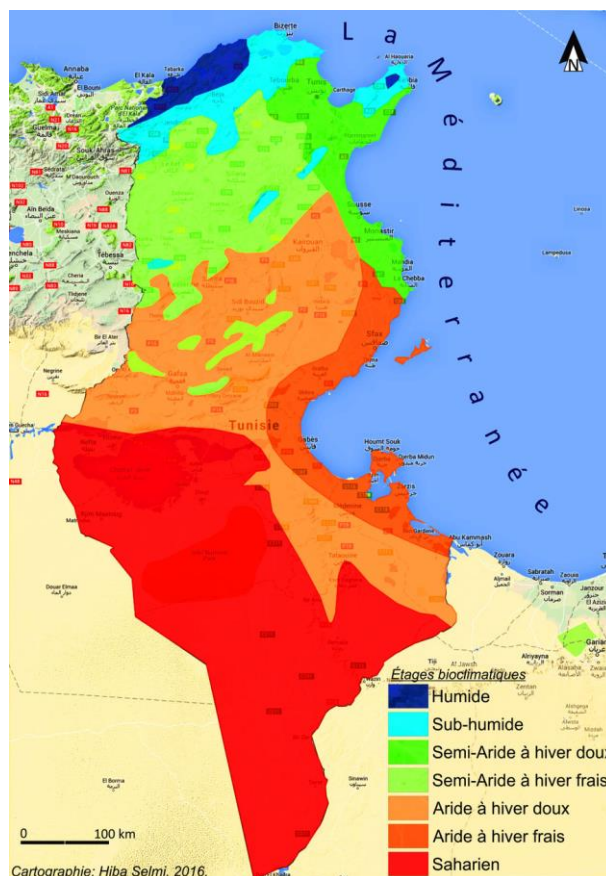


Figure 4. Carte des étages bioclimatiques de la Tunisie (Selmi, 2016)

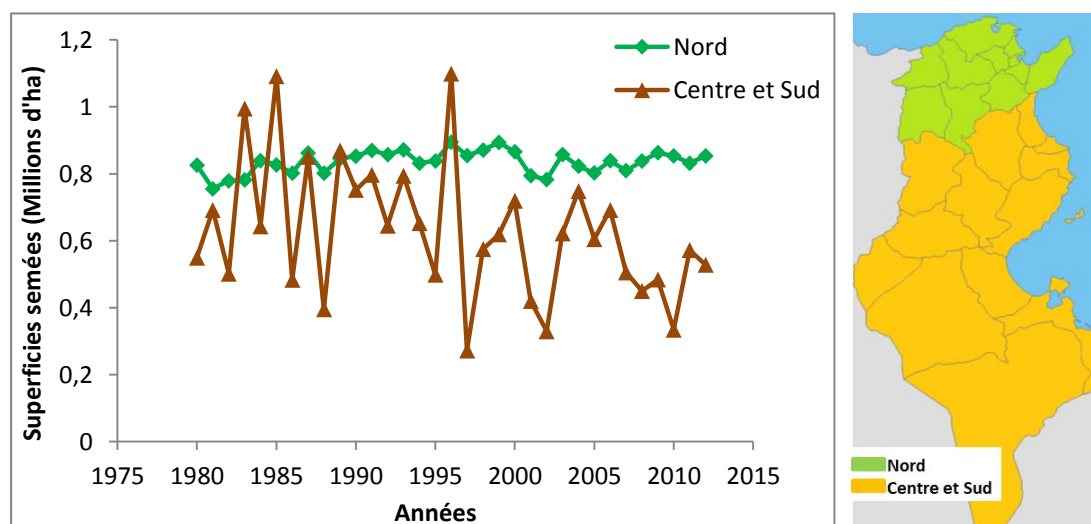


Figure 5. Evolution des superficies semées des céréales conduites en pluvial entre 1980 et 2012 par région (Nord, Centre et Sud)

Cette différence de comportement entre régions détermine en partie, au niveau national, les spécificités de comportement des différentes céréales. En effet, dans les régions du Nord (Figure 6.a), les emblavures de blé dur dont la moyenne annuelle entre 1980 et 2012 est de 490 000 ha, sont quasi-constantes et nettement supérieures aux superficies semées en orge et en blé tendre. A l'inverse, dans les régions du Centre et de Sud (Figure 6.b), les emblavures de blé dur connaissent des variations plus importantes et elles sont, certaines années, égales aux superficies d'orge, avec une moyenne annuelle d'environ 300 000 ha. Cette dernière céréale est majoritairement cultivée dans les régions les plus sèches (Ben Seleem et al, 1995). Ses superficies sont, comme pour le blé dur, relativement stables dans la région du Nord et très fluctuantes dans les régions du Centre et de Sud. En revanche, ces dernières années (2005-2012), on a assisté à une légère croissance des emblavures d'orge dans les régions du Nord. Les superficies de blé tendre, qui est principalement cultivée dans les régions les plus pluvieuses, sont les plus stables au niveau national. Dans la région du Nord, les superficies de blé tendre sont restées quasi-constantes entre 1980 et 2012 autour d'une moyenne annuelle de 100 000 ha. Dans les régions du Centre et de Sud, les superficies de blé tendre sont très faibles par rapport aux autres céréales, avec une superficie annuelle moyenne de 12 000 ha entre 1997 et 2012.

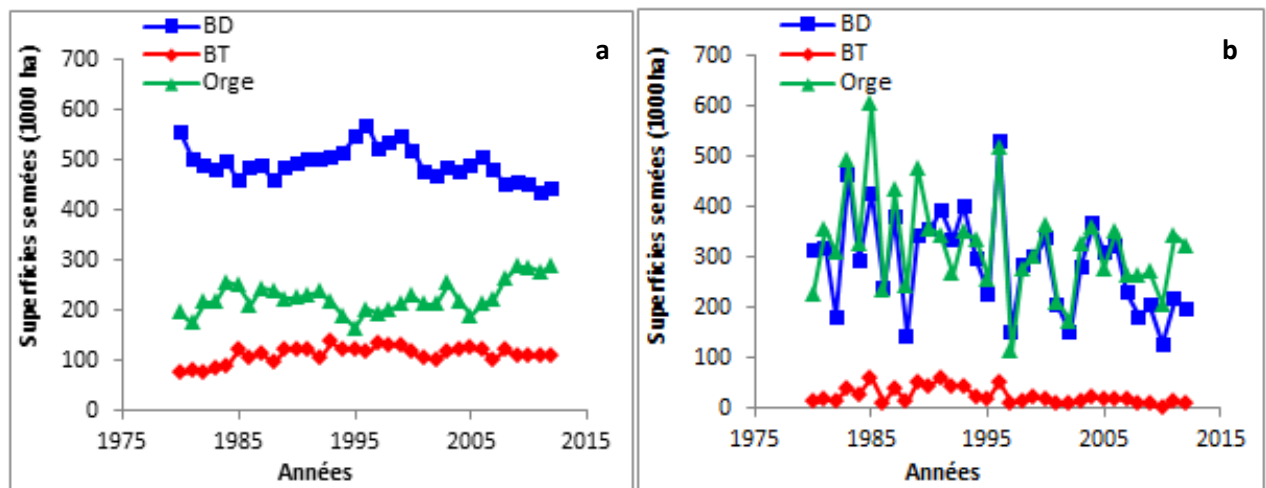


Figure 6. Evolution des superficies semées des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en pluvial dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1980 et 2012

On peut faire l'hypothèse que la variabilité régionale des superficies semées des céréales conduites en pluvial est conditionnée par la pluviométrie de la période de semis (automne). Toutefois, sur nos données, la relation entre les pluies automnales et les superficies semées n'est pas très nette. Comme on pouvait s'y attendre, dans la région de Jendouba située au Nord de la Tunisie et appartenant à l'étage bioclimatiques sub-humide, les superficies semées ne sont pas dépendantes des pluies automnales (Figure 7). Même si la relation n'est pas très nette on observe par contre une tendance à l'augmentation des superficies avec la pluviométrie automnale dans la région du centre (Kairouan) appartenant à un étage bioclimatique semi-aride inférieur (Figure 7). On constate cependant que les 2 zones se distinguent peu par cette pluviométrie automnale moyenne qui est de 181 mm à Jendouba et de 127 mm à Kairouan pour les années (1989-1994 et 2002-2009).

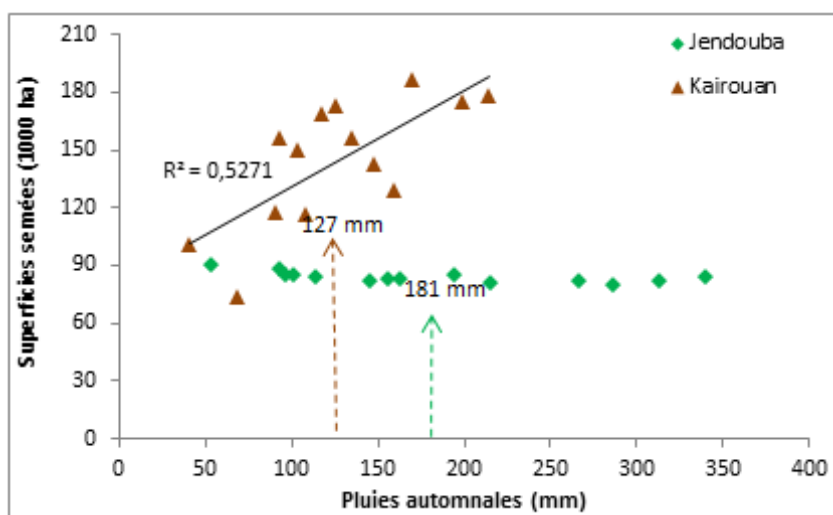


Figure 7. Relation entre les pluies automnales (de Septembre à Décembre) et les superficies semées dans une région du Nord sub-humide (Jendouba) et une région du Centre (Kairouan) appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur, pour les années (1989-1994 et 2002-2009)

1.3.3. Variabilité régionale des superficies céréalières irriguées

Les emblavures céréalières irriguées en Tunisie ne représentent qu'environ 19% de la surface totale irriguée (Lasrem et al, 2015). Entre 2001 et 2012, la moyenne annuelle des superficies céréalières irriguées est de 65 000 ha soit seulement 4% des superficies céréalières totales (DGPA, 2014). Ces superficies sont réparties de façon presque égale entre le Nord (50,5 %) et le Centre (46,4 %). Dans les régions du Nord, la plus grande part des superficies céréalières irriguées est dans le gouvernorat de Jendouba où elle représente 10% des superficies céréalières totales. Dans les régions du centre, une grande partie de la surface céréalière

irriguée est dans le gouvernorat de Kairouan où elle représente 11% de la superficie céréalière totale (Figure 8). Dans ce gouvernorat, les exploitations céréalières sont caractérisées par leur proximité à différentes sources d'eau comme le barrage de Sidi Saad proche de l'oued Zeroud et le barrage de Houreb sur l'Oued de Merguellil. Les superficies céréalières irriguées sont également importantes dans le gouvernorat de Sidi Bouzid qui appartient aussi à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur. En revanche, dans les régions du sud les superficies céréalières irriguées ne représentent que 3 % de la superficie céréalière totale.

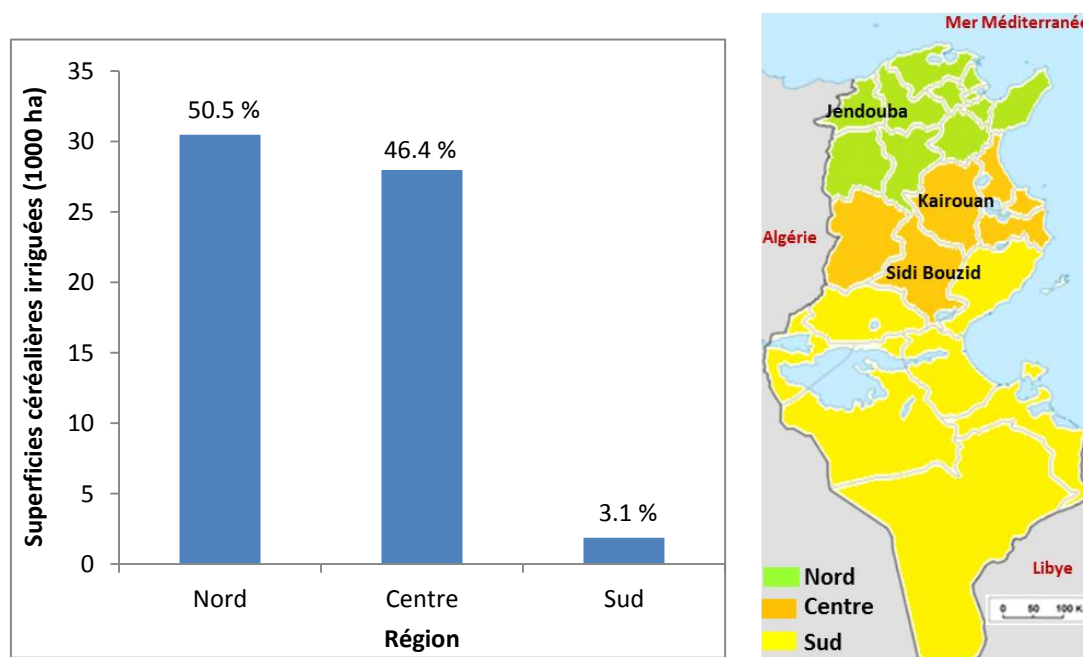


Figure 8. Moyenne des superficies céréalières irriguées dans le Nord, le Centre et le Sud de la Tunisie entre 2001 et 2012

Le blé dur occupe la plus grande partie des 65 000 ha de céréales irriguées annuellement, soit aux environs de 40 000 ha (moyenne 2001-2012) (DGPA, 2014). L'orge vient en deuxième position avec 20 000 ha et le blé tendre avec seulement 5000 ha. Dans la région du Nord, la céréale la plus irriguée est le blé dur, suivi par le blé tendre et l'orge qui est généralement peu irrigué (Figure 9.a). En pourcentage, les superficies irriguées du blé dur, de blé tendre et d'orge représente respectivement 4,5%, 3,2% et 1,6 % des superficies totales de chaque céréale (Figure 9.b). La surface irriguée en blé dur est cependant très variable entre les années. Dans les régions du Centre et de Sud, les céréales les plus cultivées dans les périmètres irrigués sont le blé dur et l'orge (Figure 9.c) qui est généralement associé aux zones à climat semi-aride dont pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 320 mm (Rezgui

et al, 2005). Les superficies de blé tendre sont très faibles dans ces régions, le pourcentage des superficies irriguées de cette céréale est de 9,8% des superficies totales de blé tendre, alors qu'il est de 6,5% pour blé dur et de 5,3% pour l'orge (Figure 9.d).

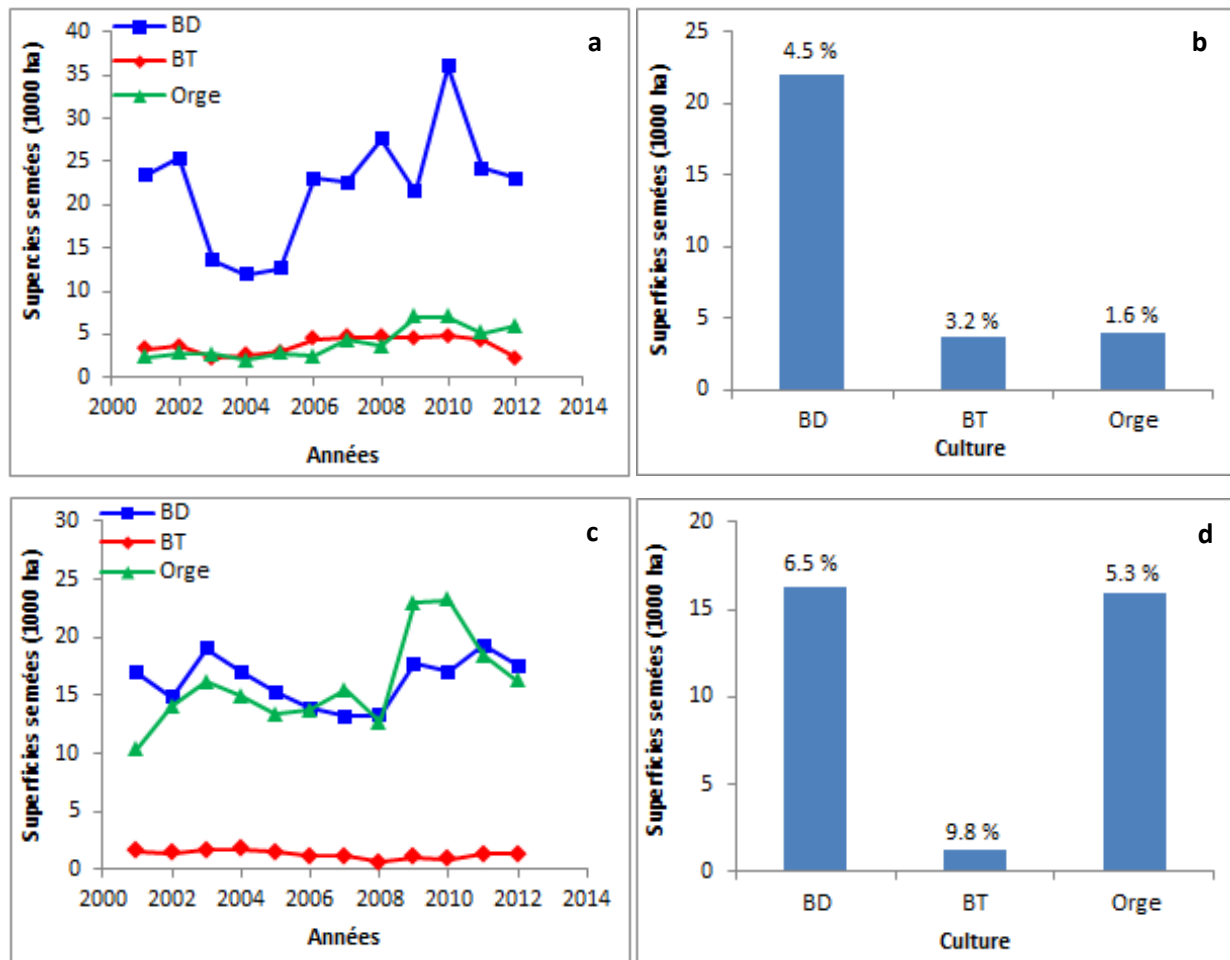


Figure 9. Evolution des superficies semées des principales céréales conduites en irrigué : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (c) et pourcentage des superficies irriguées par rapport aux superficies totales de chaque culture dans les régions du Nord (b) et les régions du Centre et de Sud (d) entre 1980 et 2012

1.4. Evolution du ratio des superficies récoltées sur les superficies semées

Outre les superficies céréalières semées, le ratio des superficies récoltées sur les superficies semées peut expliquer la variabilité interannuelle de la production céréalière en Tunisie, principalement pour les céréales conduites en pluvial. Ce ratio est très variable entre les années (Figure 10). Au cours du temps, il varie de la même façon pour toutes les céréales dans la mesure où il est généralement affecté par des conditions climatiques extrêmes telles que la sécheresse terminale (Bachta, 2011). Lorsque les rendements attendus sont très faibles et

qu'ils ne couvrent pas les frais de récolte, les cultures sont généralement pâturées par les animaux (Latiri et al, 2010). La fraction des céréales qui sont semées mais pas récoltées peut être très élevée certaines années, en particulier pour l'orge. En effet, en plus de son utilisation pour l'alimentation humaine et animale sous forme de grain avec 6 et 84% des quantités disponibles respectivement (Rastoin et Ben Abderrazik, 2014), l'orge offre l'avantage d'être cultivée à double fin : une première récolte en vert en hiver au stade tallage (coupé ou pâturé) suivie d'une récolte en grain à la maturité des nouvelles talles (Ouji et al, 2010). Cette double exploitation pourrait être à l'origine de la réduction des rendements notamment les années sèches. Dans ce cas, plusieurs facteurs entrent en jeu tels que l'inhibition de la formation des talles, l'avortement d'une partie des talles et la réduction de la disponibilité des assimilats pour assurer un remplissage adéquat et un développement normal des grains. Dans le cas des années à printemps très sec le manque de fourrages pour les animaux peut même conduire à une baisse de la superficie récoltée.

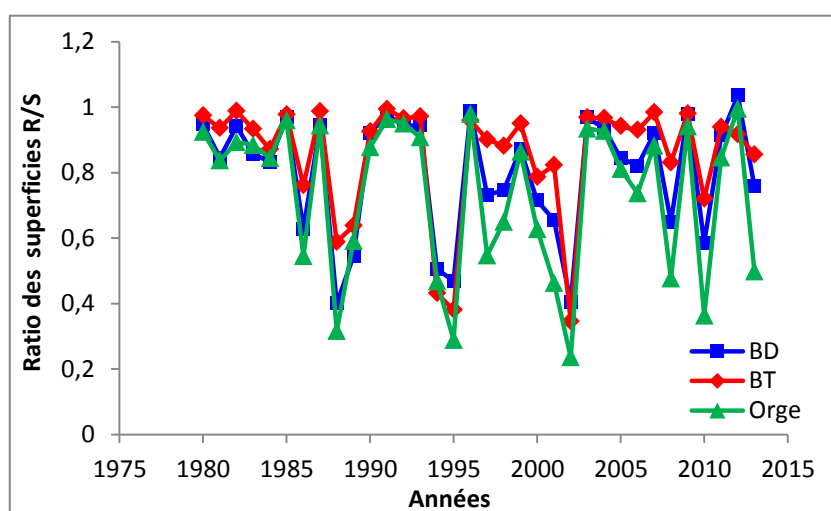


Figure 10. Evolution du ratio des superficies récoltées et des superficies semées des trois principales céréales cultivées en Tunisie : Blé dur (BD), Blé tendre (BT) et Orge entre 1980 et 2013

La variabilité nationale du ratio des superficies récoltées sur les superficies semées des céréales conduites en pluvial cache des différences régionales. En effet, dans les régions du Nord dont quelques gouvernorats appartiennent à l'étage bioclimatique subhumide (pluviométrie annuelle entre 600 et 800 mm) et d'autres appartiennent à l'étage semi-aride supérieur (pluviométrie annuelle entre 400 et 600 mm) (Skouri, 1994), le ratio des superficies récoltées et des superficies emblavées était variable entre 1988 et 2012 mais il était proche de 1 dans la plupart des cas (Figure 11). En 1988, ce ratio a atteint une valeur minimale de

0,32. Dans les régions du Centre et de Sud, où il y a prépondérance du semi-aride inférieur (pluviométrie annuelle entre 300 et 600 mm) et de l'aride (pluviométrie annuelle entre 100 et 300 mm), le ratio des superficies récoltées sur les superficies semées est très variable entre années et peut atteindre des valeurs très basses de l'ordre de 0,15 comme en 2001, 2002 et 2010 (Figure 11). Cette différence de comportement entre régions détermine en partie, au niveau national, les spécificités de comportement des différentes céréales. En effet, le ratio des superficies récoltées et des superficies semées de blés, essentiellement de blé tendre qui est une céréale généralement cultivée dans les régions les plus pluvieuses, est moins variable que pour l'orge (Figure 10).

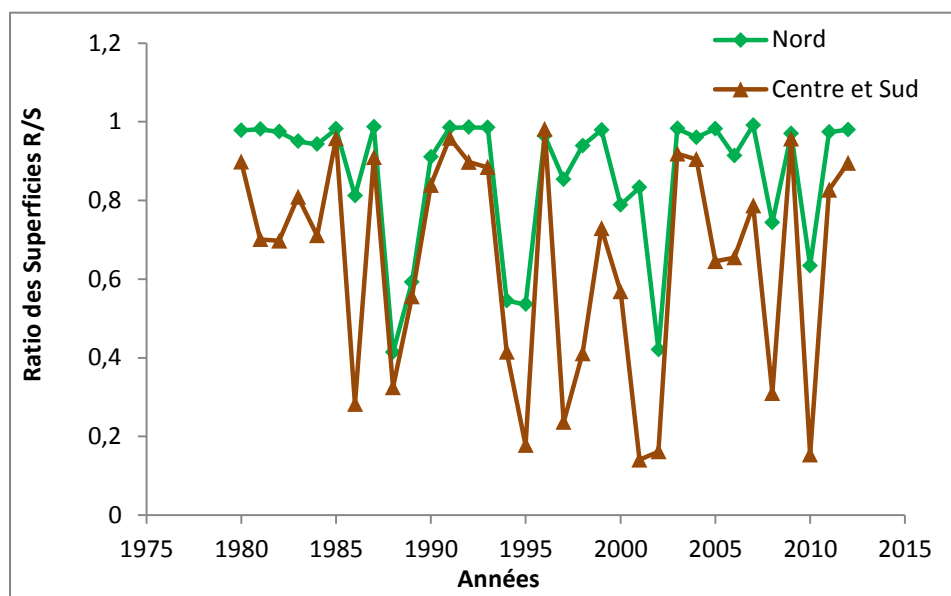


Figure 11. Evolution du ratio des superficies récoltées et des superficies semées des céréales conduites en pluvial dans les régions du Nord et du Centre et de Sud entre 1980 et 2013

Dans ce contexte, les travaux d'Araus et al (2003) ont montré que le déficit hydrique pendant la période de remplissage des grains (sécheresses terminales) accélère la senescence foliaire des céréales cultivées dans des conditions méditerranéennes, causant des mortalités prématurées. Ceci nous a ramené à faire l'hypothèse que la variabilité régionale du ratio des superficies récoltées et des superficies semées des céréales conduites en pluvial est déterminée par la pluviométrie du printemps. Comme attendu, ce ratio n'est pas corrélé aux pluies printanières pour la région de Jendouba appartenant au Nord sub-humide (Figure 12) alors qu'il l'est, bien que faiblement, pour le cas de la région du Kairouan située dans le Centre semi-aride.

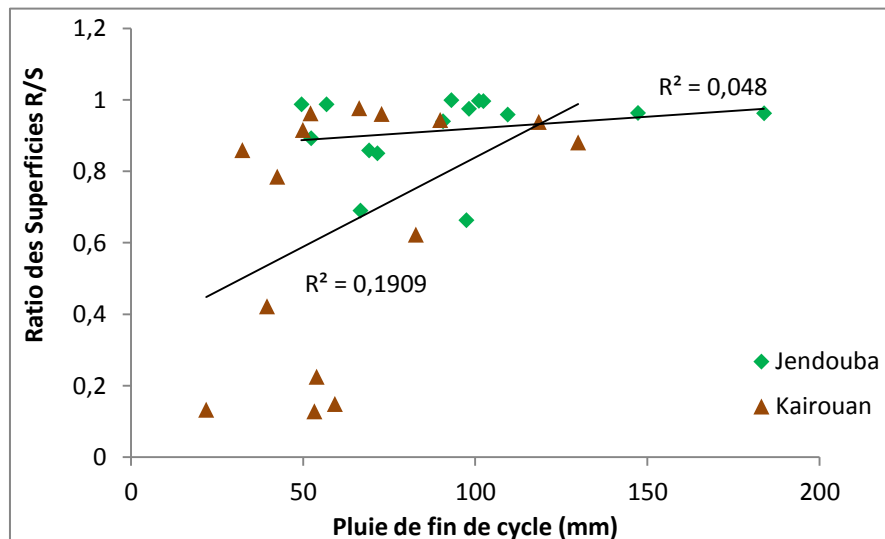


Figure 12. Relation entre les pluies de printemps (d’Avril à Juin) et le ratio des superficies récoltées sur les superficies semées dans une région du Nord sub-humide (Jendouba) et une région du Centre semi-aride (Kairouan), pour les années (1989-1995 et 2002-2009)

1.5. Evolution des rendements céréaliers

1.5.1. Variabilité interannuelle des rendements céréaliers

Au cours de la seconde moitié du XXe siècle, une augmentation significative des rendements céréaliers a été observée dans plusieurs régions du monde (Latiri et al, 2010). Cette augmentation a été permise grâce au progrès génétique, à l’utilisation d’engrais et de pesticides ainsi qu’à l’irrigation. En Tunisie, les effets conjugués de la recherche en amélioration génétique et du développement des nouvelles techniques de production des céréales ont contribué à l’augmentation des rendements des céréales depuis le début du vingtième siècle (El Felah et al, 2014) et particulièrement dans sa deuxième moitié passant de 0,5 t/ha en 1961 à 1,85 en 2013 (FAOSTAT, 2014). Des rendements de 6 t/ha sont couramment obtenus par les agriculteurs les plus techniques dans les zones favorables du Nord et sous complément d’irrigation au Centre comme au Nord du pays. En revanche, les rendements sont restés relativement faibles malgré les mesures entreprises en faveur du secteur agricole en général et des céréales en particulier, notamment les incitations à la production et à l’investissement, l’amélioration des services d’appui à l’activité agricole tels que le crédit agricole, la vulgarisation, la formation et les mesures spécifiques mises en œuvre dans le cadre des stratégies sectorielles. Un changement radical de la politique des prix des céréales au niveau de la production a été constaté depuis le milieu des années 90 à travers la fixation de prix incitatifs, ce qui a permis de booster la production nationale (CPP, 2013).

A cela s'ajoute une politique de relance de la production basée sur la fourniture de semences à bas prix, la promotion de nouvelles variétés et l'incitation à l'irrigation de complément (souvent largement subventionnée). Les semences céréalières sont produites à l'échelle nationale et les agriculteurs s'approvisionnent à 80% sur le marché pour le blé et s'auto approvisionnent à 80% pour l'orge. L'utilisation des semences sélectionnées reste en deçà des attentes, soit environ 10% des quantités de semences utilisées (El Felah et al, 2014)

Au cours des dernières décennies (1980-2013), les rendements des céréales calculés par rapport aux superficies récoltées, ont connu une variabilité interannuelle considérable, allant de 0,7 à 2,1 t/ha pour le blé dur, de 0,8 à 2,6 t/ha pour le blé tendre et de 0,4 à 1,7 t/ha pour l'orge. Mais cette variabilité est nettement orientée à la hausse depuis 1980 (Figure 13). Bien que la production des céréales soit beaucoup plus importante en Algérie et au Maroc qui fournissent respectivement 56 et 23% de la production céréalière des pays de Maghreb, la Tunisie a les meilleures rendements, avec une moyenne décennale (2000-2010) de 1,7 t/ha, devant le Maroc (1,5 t/ha) et l'Algérie (1,3 t/ha) (Rastoin et Benabderrazik, 2014).

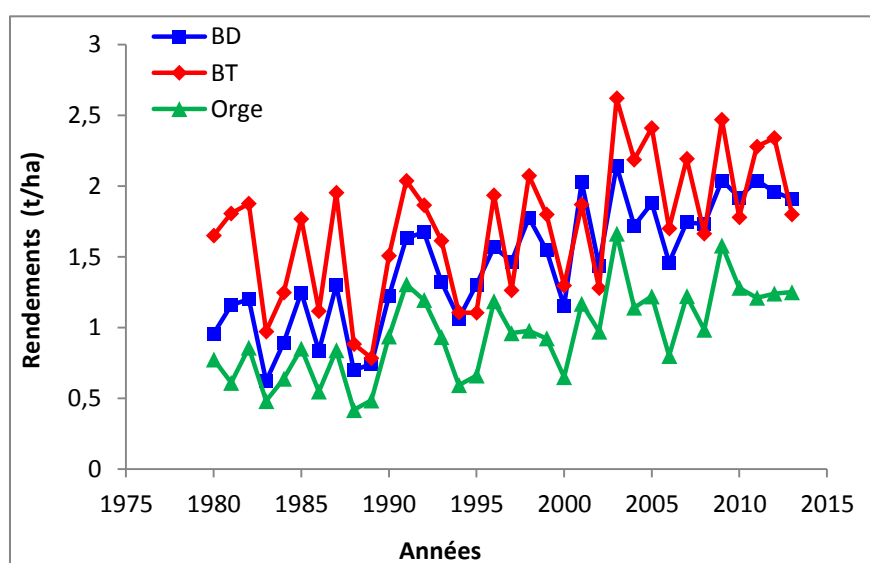


Figure 13. Evolution des rendements des trois principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge de 1980 à 2013

1.5.2. Variabilité régionale des rendements des céréales conduites en pluvial

Le rendement des trois principales céréales cultivées en pluvial a sensiblement augmenté depuis 1970 grâce au développement des variétés permettant d'atténuer les effets négatifs des périodes de sécheresse et à l'amélioration des pratiques culturales (Bhouri Khila et al, 2015). Toutefois, les rendements demeurent très fluctuants et limités par le régime pluviométrique caractérisé par une pluviométrie faible, irrégulière et extrêmement variable (Skouri, 1994).

Dans la région du Nord, le rendement moyen des céréales conduites en pluvial est de 1,9 t/ha pour la dernière décennie (2002-2012) (Figure 14). Dans les régions du Centre et du Sud, les rendements céréaliers sont généralement inférieurs à ceux enregistrés dans les régions du Nord, sauf en 2002 et en 2010. Dans la dernière décennie (2002-2012), le rendement moyen obtenu dans ces régions est de 1,3 t/ha. Au cours du temps, les rendements varient de la même façon pour toutes les céréales dans la mesure où ils sont généralement affectés par l'irrégularité et la rareté des pluies même dans les régions du Nord (Figure 15.a). Dans ces régions le rendement de blé dur a varié de 0,7 t/ha obtenu en 1988 à 2,5 t/ha en 2003 avec une moyenne de 2 t/ha enregistrée dans la dernière décennie (2002-2012). Ce rendement reste en deçà de celui enregistré dans la même période en France qui est de 4.7 t/ha, mais proche des rendements moyens obtenus en Espagne (2,1 t/ha) et en Italie (2,6 t/ha). Le rendement du blé tendre est généralement légèrement supérieur à celui du blé dur avec une moyenne de 2,15 t/ha dans la dernière décennie (2002-2012). Pour l'orge, les rendements sont souvent inférieurs aux rendements des deux autres céréales. Ils varient d'une valeur minimale de 0,58 t/ha obtenue en 1988 à une valeur maximale de 2,26 t/ha obtenue en 2003. Dans les régions du Centre et de Sud, la variabilité des rendements est du même ordre entre les trois céréales mais elle est importante d'une année à l'autre (Figure 15.b). En effet, ces rendements des céréales ont connu une variabilité interannuelle allant de 0,23 à 2,9 t/ha pour le blé dur, de 0,29 à 2,6 t/ha pour le blé tendre et de 0,25 à 2,32 t/ha pour l'orge.

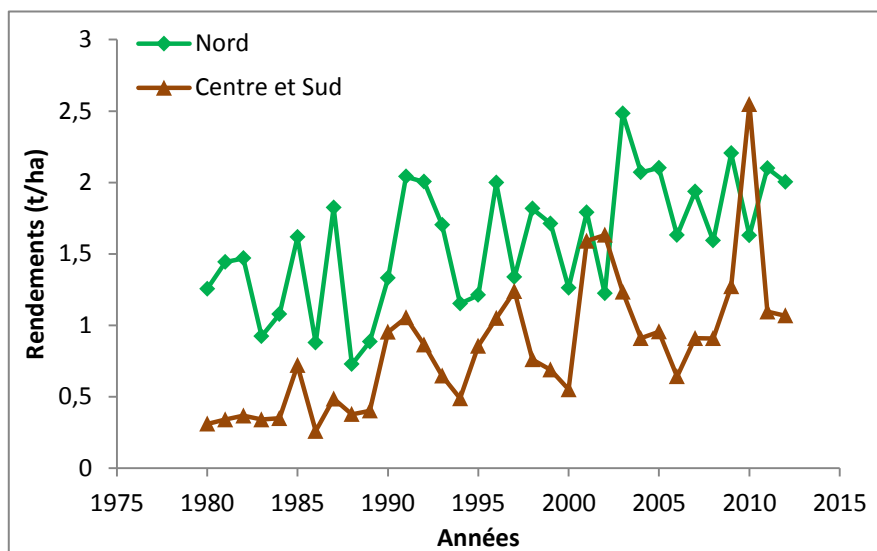


Figure 14. Evolution des rendements des céréales conduites en pluvial entre 1980 et 2012 par région (Nord, Centre et Sud)

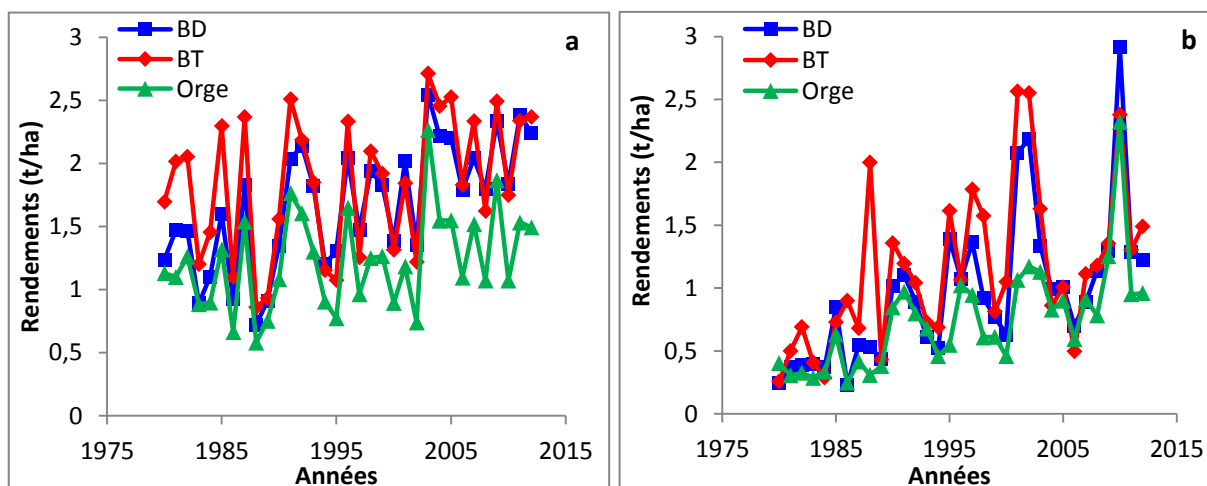


Figure 15. Evolution des rendements des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en pluvial dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1980 et 2012

1.5.3. Variabilité régionale des rendements des céréales conduites en irrigué

Dans les régions à climat semi-aride, l'eau est le principal facteur limitant le rendement des cultures en général et des céréales en particulier (Latiri et al, 2010). Dans l'objectif d'améliorer la productivité et de limiter les importations, la Tunisie continue à déployer des efforts considérables afin de promouvoir les cultures céréalières en irrigué (Mailhol et al, 2004). En effet, l'écart de rendement dû à l'eau est important. La moyenne des rendements de céréales conduites en irrigué est de 3,6 t/ha entre 1999 et 2012 (Figure 16.a) soit presque le double du rendement en pluvial. Pour le blé dur et le blé tendre le rendement moyen obtenu à l'échelle nationale entre 1999 et 2013 est de 3,9 t/ha (Figure 16.b). Toutefois, ce rendement est largement inférieur au rendement potentiel (7 t/ha) (Mailhol et al, 2004). En effet, la Tunisie est comme la plupart des pays du sud de la méditerranée en situation de stress hydrique sévère (Milano et al, 2013) en raison de la rareté des ressources en eau disponibles et de la forte demande en eau surtout de la part du secteur agricole. D'autres facteurs pourraient expliquer les faibles rendements obtenus en irrigué, comme l'inefficacité des réseaux d'irrigation et des calendriers appliqués par les agriculteurs, la mauvaise gestion de la fertilisation et des pratiques phytosanitaires et les chaleurs extrêmes. Pour l'orge, quand elle est irriguée, le niveau de rendement est souvent inférieur à celui de blé dur et de blé tendre, avec une moyenne de rendement de 3 t/ha.

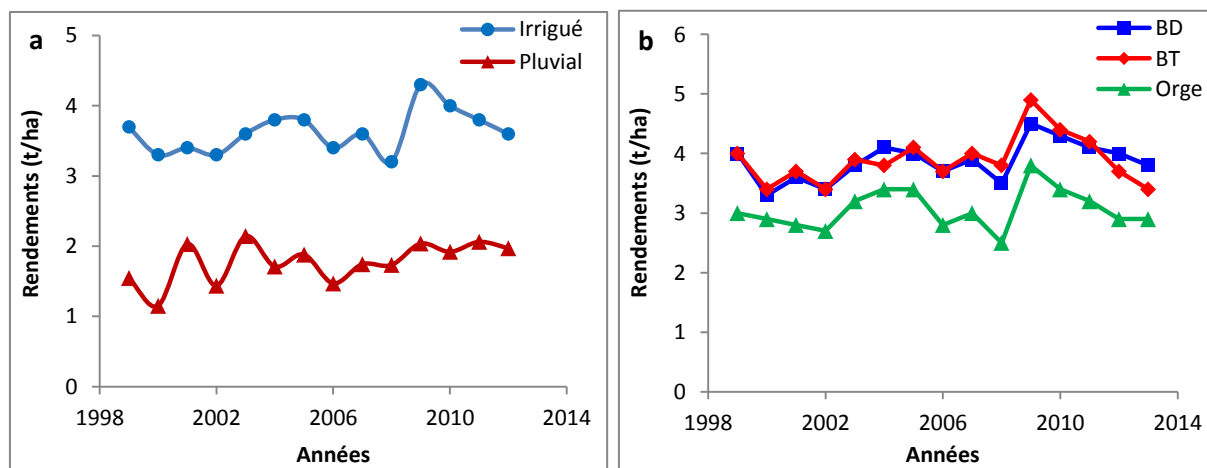


Figure 16. Evolution des rendements des céréales conduites en pluvial et en irrigué entre 1999 et 2012 (a) et variation des rendements des principaux céréales conduites en irrigué : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge entre 1999 et 2013

A l'échelle nationale, le rendement des trois principales céréales conduites en irrigué est peu variable entre années mais il ne montre aucune tendance à la hausse. Dans les régions du Nord, le rendement varie de la même façon pour toutes les céréales dans la mesure où il est généralement dépendant de la disponibilité des ressources hydriques. Entre 1999 et 2013, les rendements de blé dur et de blé tendre obtenus dans les régions du Nord sont du même ordre de grandeur (Figure 17.a). Ils ont varié d'une valeur minimale de 3 t/ha obtenue en 2012 à une valeur maximale de 4,7 t/ha en 2009. Pour l'orge, le rendement a varié de 2,3 à 3,9 t/ha, obtenus respectivement en 2002 et 2009. Dans les régions du Centre et de Sud, les rendements de blé dur et d'orge varient de la même façon entre 1999 et 2013 avec un écart de rendement moyen de 0,9 t/ha entre les deux cultures (Figure 17.b). En revanche, le rendement du blé tendre était inférieur à celui du blé dur entre 1999 et 2008. Ceci pourrait être expliqué par le fait que cette céréale est moins bien adaptée que le blé dur et l'orge au climat semi-aride, notamment aux fortes températures, même en présence d'irrigation.

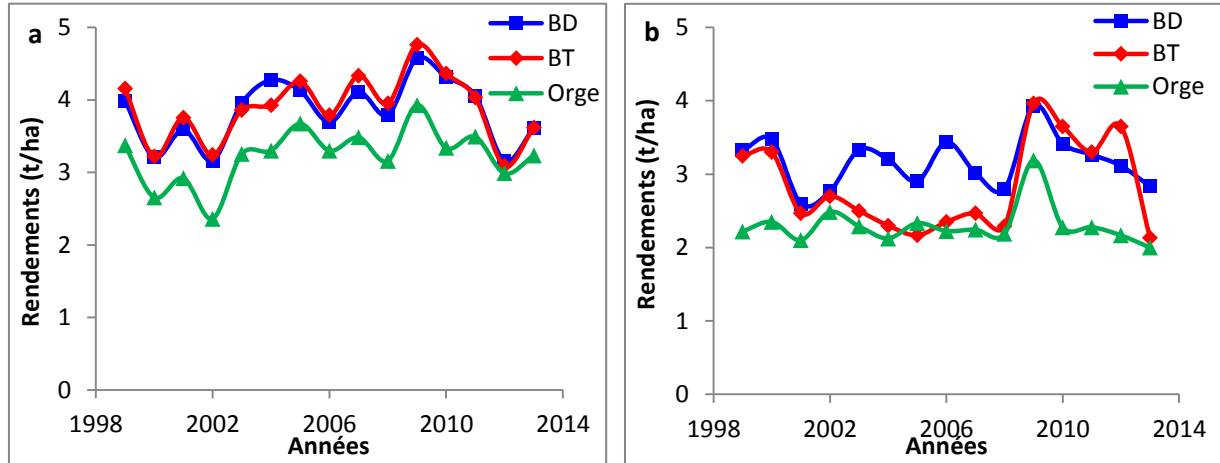


Figure 17. Evolution des rendements des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en irrigué dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1999 et 2013

2. Analyse des déterminants de la production céréalière tunisienne

Comme nous venons de le voir, la production céréalière à l'échelle du pays et de la région est caractérisée par une forte variabilité interannuelle qui résulte des fluctuations interannuelles des superficies semées, du ratio superficies récoltées sur superficies semées et des rendements. Ces termes de l'identité (Eq.1) permettent d'expliquer la variabilité de la production en fonction de la culture, la région et le mode de conduite. Comme l'eau est le principal facteur limitant le rendement, on peut restructurer l'identité en fonction du mode de conduite (Eq.2 et Eq.3).

$$\text{Production} \equiv \text{Superficies semées} \times \frac{\text{Superficies récoltées}}{\text{Superficies semées}} \times \frac{\text{Production}}{\text{Superficies récoltées}}$$

$$\text{(Eq. 2) Production en pluvial} \equiv \text{Superficies S (P)} \times \frac{\text{Superficies R (P)}}{\text{Superficies S (P)}} \times \frac{\text{Production (P)}}{\text{Superficies R (P)}}$$

$$\text{(Eq. 3) Production en irrigué} \equiv \text{Superficies S (I)} \times \frac{\text{Superficies R (I)}}{\text{Superficies S (I)}} \times \frac{\text{Production (I)}}{\text{Superficies R (I)}}$$

S : semées, R : récoltées, P : en pluvial, I : en irrigué

2.1. Analyse de la variabilité de production des céréales conduites en pluvial

La production céréalière est essentiellement localisée dans le nord du pays (Figure 1). Pour la période entre 1980 et 2012, la production moyenne des céréales conduites en pluvial dans les régions du Nord avoisine les 1,2 Millions de tonnes sur environ 722 000 ha ce qui représente 78% de la production totale et 62% de la superficie céréalière du pays (DGPA, 2014). Dans ces régions, la production du blé dur, du blé tendre et de l'orge n'est pas dépendante des superficies semées (Figure 18.a) qui étaient relativement stables entre les années. Les régions du Centre et du Sud produisent environ 22% de céréales en pluvial sur une superficie de 444 000 ha qui représente 38% de la superficie totale. Dans ces régions, la variabilité interannuelle de la production céréalière dépend en partie de la variabilité des superficies semées (Figure 18.b). La relation entre la production et les superficies semées pour le blé dur et l'orge montrent une faible corrélation positive avec des coefficients de corrélations r de 0,63 et 0,59 respectivement (p -value $< 0,05$ selon le test de Pearson) (Tableau 2). Pour le blé tendre, la corrélation est plus nette, avec un coefficient de corrélation $r = 0,83$.

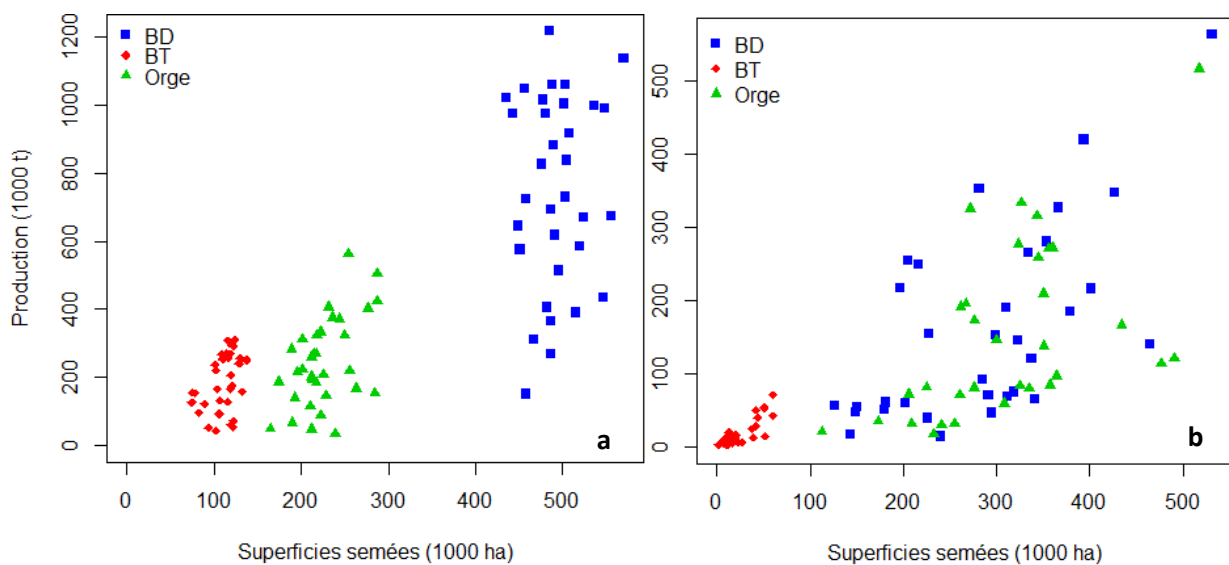


Figure 18. Relation entre la production et les superficies semées des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en pluvial dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1980 et 2012

La variabilité interannuelle de la production céréalière en pluvial peut aussi dépendre du ratio des superficies récoltées et des superficies semées, lui-même dépendant de la pluviométrie printanière. Dans les régions du Nord, la production est bien corrélée à ce ratio avec un

coefficient de corrélation r de 0,8, 0,75 et 0,76 (p -value $< 0,05$) pour le blé dur, le blé tendre et l'orge respectivement (Figure 19.a, Tableau 2). De même pour les régions du Centre et de Sud, la production est bien corrélée au ratio des superficies récoltées et des superficies semées pour le blé dur et l'orge avec un coefficient de corrélation r de 0,76 et 0,77 respectivement (p -value $< 0,05$). Pour le blé tendre, la liaison entre les deux variables est plus faible, avec un $r = 0,56$ (Figure 19.b).

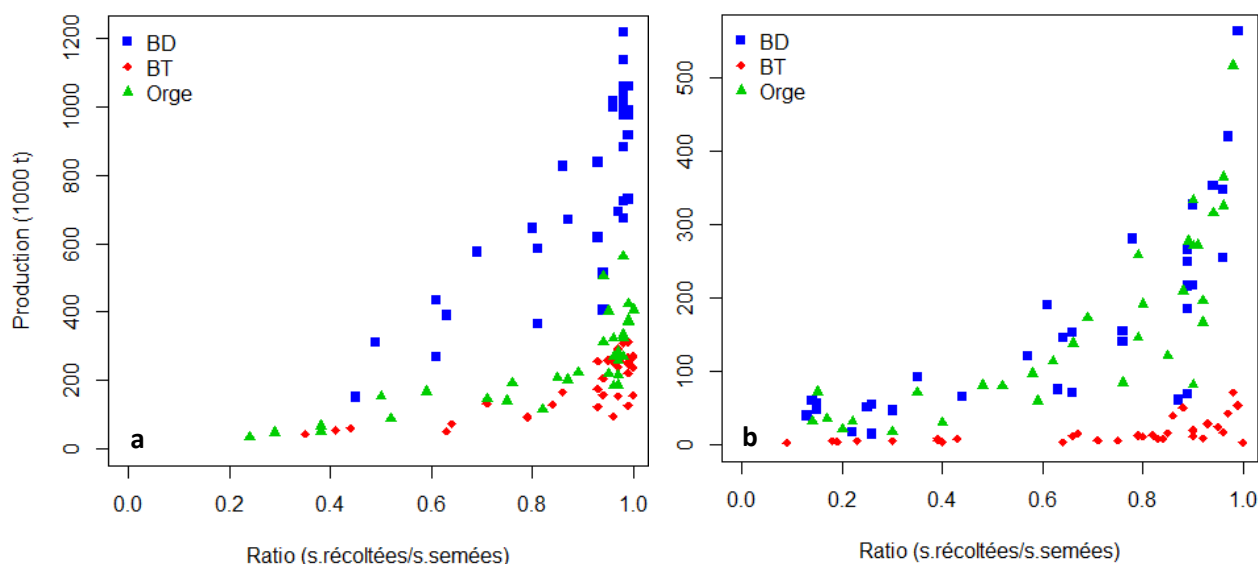


Figure 19. Relation entre la production et le ratio des superficies récoltées et des superficies semées des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en pluvial dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1980 et 2012

Au cours des dernières décennies (1980-2012), les rendements des céréales conduites en pluvial ont connu une variabilité interannuelle considérable orientée à la hausse. Cette variabilité peut expliquer en partie la variabilité de la production céréalière. En revanche, la relation entre la production et les rendements céréaliers semble différente entre les régions. Dans les régions du Nord, la production est fortement corrélée aux rendements pour les trois céréales avec des coefficients de corrélation r supérieurs à 0,9 (p -value $< 0,05$) (Figure 20.a, Tableau 2). Ceci témoigne du fait que les superficies emblavées et les superficies récoltées ne varient pas beaucoup et que le rendement est le principal facteur qui contribue à variation de la production. Dans les régions du Centre et de Sud, la production n'est pas corrélée aux rendements avec un coefficient de corrélation non significatif (p -value $> 0,05$ selon le test de Pearson) (Tableau 2) pour les trois céréales (Figure 20.b). Ceci confirme la forte dépendance

de la production aux autres termes de l'identité 2 que sont les superficies emblavées et surtout le ratio superficies récoltées sur superficies semées. Dans ces régions les stratégies orientées uniquement sur l'amélioration des rendements auront donc un effet limité sur la production contrairement à la région du Nord.

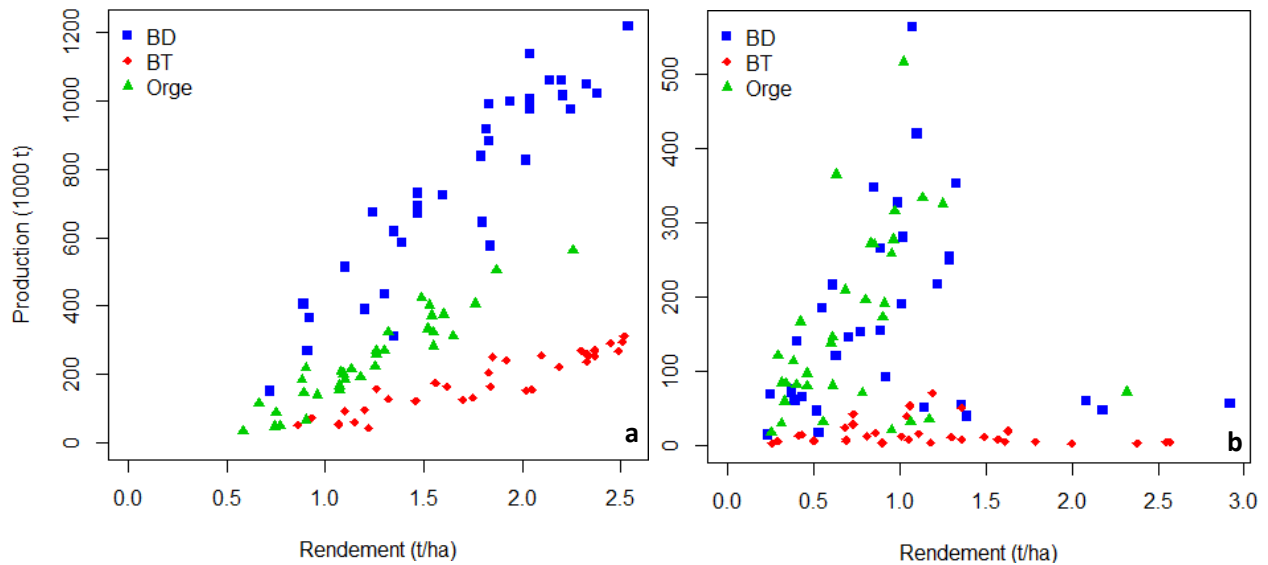


Figure 20. Relation entre la production et les rendements des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en pluvial dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1980 et 2012

Tableau 2. Coefficient de corrélation linéaire mettant en relation la production céréalière en pluvial et ses variables explicatives, p-value calculée à un seuil de confiance de 95 % (test de Pearson), les valeurs en gras correspondent aux variables qui expliquent le mieux la production et les valeurs en italiques correspondent aux corrélations non significatifs

Nord	S. Semées	p-value	S. Récoltées/ S. Semées	p-value	Rendement	p-value
Blé dur	0,10	<i>0,50546621</i>	0,80	2,1686E-08	0,92	1,7671E-14
Blé tendre	0,38	0,04056523	0,75	1,5558E-07	0,93	5,0459E-15
Orge	0,50	0,00315483	0,76	2,2033E-07	0,95	1,3106E-16
Centre et Sud						
Blé dur	0,63	6,446E-05	0,76	5,3845E-08	0,06	<i>0,87200379</i>
Blé tendre	0,83	4,5005E-09	0,56	0,00023457	-0,14	0,31619941
Orge	0,59	0,00047978	0,77	3,4556E-08	0,28	0,13978707

En conclusion, la relation entre la production céréalière pluviale et les différentes variables explicatives (superficies semées, ratio des superficies récoltées sur superficies semées et rendements) a permis de calculer le coefficient de corrélation r (Tableau 2). Dans la région du nord, le rendement est la variable qui explique le mieux la production des trois céréales. A l'inverse, dans les régions du Centre et de Sud, la production est expliquée principalement par le ratio des superficies récoltées sur superficies semées, sauf pour le blé tendre, dont la production est expliquée par les superficies semées.

2.2. Analyse de la variabilité de production des céréales conduites en irrigué

En Tunisie, 13% de la production céréalière est assurée par les exploitations situées dans les périmètres irrigués qui représentent 7% des superficies céréalières. La variabilité de la production des céréales irriguées est dépendante principalement des superficies semées et des rendements. Dans les régions du Nord, la production est corrélée aux superficies semées pour le blé tendre et l'orge avec un coefficient de corrélation r de 0,79 et 0,65 respectivement (Figure 21.a, Tableau 3). Cependant, la corrélation n'est pas significative pour le blé dur (p -value $> 0,05$). Dans les régions du Centre et de Sud, la production est bien corrélée aux emblavures pour le blé dur ($r = 0,73$) et l'orge ($r = 0,93$) qui est la céréale la plus cultivée dans ces régions à climat semi-aride et aride (Figure 21.b, Tableau 3), mais la corrélation n'est pas significative pour le blé tendre (p -value $> 0,05$).

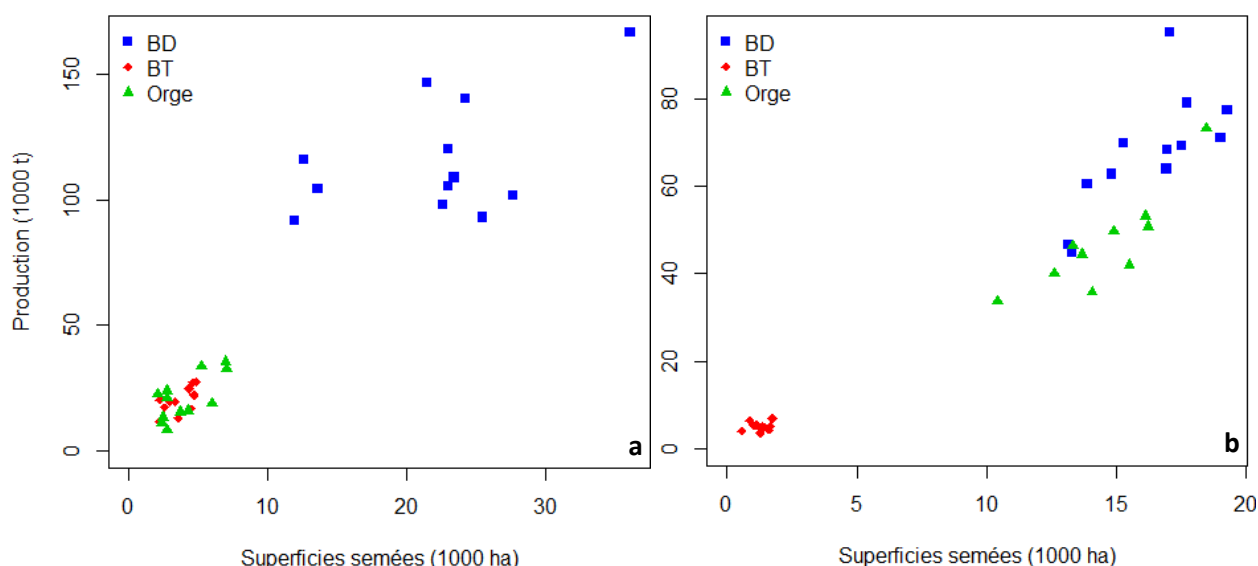


Figure 21. Relation entre la production et les superficies semées des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en irrigué dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 2001 et 2012

Dans les régions du Nord, la production est corrélée aux rendements pour le blé tendre ($r = 0,87$) et l'orge ($r = 0,69$) (Figure 22.a, Tableau 3). Pour le blé dur, la relation entre la production et les rendements ne montre pas de corrélation significative ($p\text{-value} > 0,05$). Dans les régions du Centre et de Sud, la corrélation entre la production et les rendements n'est pas significative pour les trois céréales ($p\text{-value} > 0,05$) (Figure 22.b, Tableau 3).

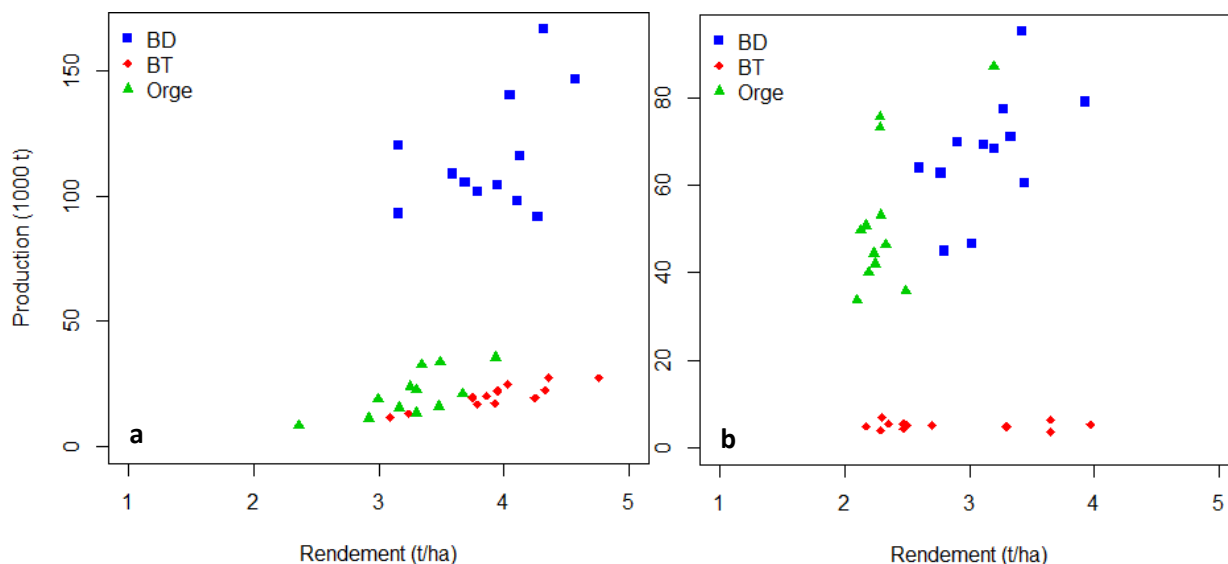


Figure 22. Relation entre la production et les rendements des principales céréales cultivées en Tunisie : blé dur (BD), blé tendre (BT) et orge et conduites en irrigué dans les régions du Nord (a) et les régions du Centre et de Sud (b) entre 1999 et 2013

Tableau 3. Coefficient de corrélation linéaire mettant en relation la production céréalière en irrigué et ses variables explicatives, $p\text{-value}$ calculée à un seuil de confiance de 95 % (test de Pearson), les valeurs en gras correspondent aux variables qui expliquent le mieux la production et les valeurs en italiques correspondent aux corrélations non significatifs

Nord	S. Semées	p-value	Rendement	p-value
Blé dur	0,51	<i>0,09870574</i>	0,46	<i>0,16642071</i>
Blé tendre	0,66	0,02793441	0,89	0,00023684
Orge	0,70	0,02517609	0,71	0,02113143
Centre et Sud				
Blé dur	0,73	0,00837774	0,55	<i>0,06099286</i>
Blé tendre	0,21	0,30690199	-0,06	<i>0,72669707</i>
Orge	0,94	3,0961E-05	0,62	<i>0,05843638</i>

En conclusion, la production céréalière particulièrement de blé tendre et d'orge dans la région du nord, est mieux expliquée par la variation des rendements (Tableau 3). Dans les régions du centre et du sud, la production céréalière en irrigué, principalement du blé dur et d'orge est mieux expliquée par les superficies semées.

Conclusion du chapitre

En se basant sur la littérature et sur l'analyse de la variabilité interannuelle de la production céréalière et de ses déterminants, nous avons exposé dans ce chapitre la situation des céréales en Tunisie. La production céréalière, conduite essentiellement en pluvial, représente depuis des millénaires, une activité économique et sociale stratégique et de premier plan en Tunisie. Le blé dur, l'orge et le blé tendre sont les céréales les plus cultivées en Tunisie. La variabilité de la production de ces trois céréales dépend de la variabilité des rendements, mais aussi des superficies semées et du ratio des superficies récoltées sur superficies semées. Pour répondre aux besoins de la population, la production céréalière, notamment de blé dur qui est la principale céréale en Tunisie, pourrait augmenter en augmentant le rendement. Dans les chapitres qui suivent nous nous centrons sur le rendement, sachant que les autres variables, mériteraient aussi d'être prises en compte mais cela nécessiterait des études à l'échelle de l'exploitation sur les stratégies de gestion des cultures et des troupeaux. Toutefois, l'augmentation des rendements est généralement associée à une baisse de l'efficacité de l'utilisation des ressources, principalement l'eau et l'azote.

Chapitre 2 : Le blé dur dans le nexus alimentation-eau-azote : Problématique et démarche de la thèse

Objectifs du chapitre

Ce chapitre a pour objectif d'exposer la problématique de l'efficience de l'eau et de l'azote pour la production de blé dur en Tunisie et d'analyser la relation entre la production et l'efficience de ces deux ressources à différentes échelles (parcelle, région, pays). Ce chapitre est divisé en trois parties : Une première partie sur le blé dur dans le nexus production-eau-N qui permet de déduire la deuxième et la troisième partie qui décrivent les objectifs de la thèse ainsi que la démarche méthodologique générale suivie.

1. Efficience de l'eau et de l'azote pour la production de blé dur en Tunisie

1.1. Le blé dur dans le nexus rendement, eau et azote

En méditerranée, le blé dur (*Triticum turgidum* var. *Durum*) qui occupe une place essentielle dans l'alimentation humaine, est traditionnellement cultivé en conditions pluviales marquées par de grandes fluctuations climatiques entre années. Dans ces régions, la production de blé dur est fréquemment soumise à des pluies saisonnières insuffisantes, combinée souvent avec des stress thermiques et hydriques qui pourraient affecter grandement le rendement en grains (Nazco et al, 2014). Toutefois, dans la plupart des cas, les conditions climatiques méditerranéennes durant la période de remplissage des grains permettent de produire du blé dur de haute qualité technologique répondant aux exigences du marché. Contrairement au blé tendre, le blé dur est caractérisé par sa qualité protéique des grains adaptée à la transformation en pâte et en semoule (Sissons, 2008), ce qui rend cette céréale destinée principalement à l'alimentation humaine.

Occupant depuis toujours la première place des superficies réservées aux céréales, le blé dur représente la céréale la plus cultivée en Tunisie (Latiri et al, 2010). Toutefois, la production moyenne actuelle du blé dur en Tunisie demeure nettement en deçà des potentialités et des besoins du pays. Ceci est attribué aux pertes de production causées par les maladies cryptogamiques (Ammar et al, 2011), la nature des sols (Anderson et Impiglia, 2002), l'inadéquation de la date de semis avec les variétés et les conditions environnementales (Murray et al, 1990) et la rotation inappropriée des cultures (López-Bellido et López-Bellido, 2001). Néanmoins, malgré la fréquence d'occurrence notable de ces facteurs dans le temps et dans l'espace, la contrainte hydrique demeure le principal facteur limitant la production de blé

dur en Tunisie (Lebdi, 2009). L'azote est aussi un facteur majeur, déterminant la production de blé dur en Tunisie (Latiri-Souki, 1998).

Pour augmenter la production du blé dur en Tunisie, deux solutions non contradictoires se présentent : (i) accroître les superficies emblavées et le pourcentage des superficies récoltées par rapport aux superficies semées, ou (ii) augmenter les rendements c'est-à-dire la productivité des terres cultivées (Chapitre 1) (Eq.1).

$$\text{Production} \equiv \text{Rendement} \times \text{Superficies récoltées} \quad (\text{Eq.1})$$

L'accroissement des rendements de blé dur par l'irrigation de complément et par les apports d'engrais azotés ont été toujours suggérés comme leviers essentiels (Boussen et al, 2005). Toutefois, au-delà du coût élevé de ces pratiques et des risques de pollution de l'environnement (Guarda et al, 2004), une question demeure autour de l'efficacité des pratiques d'irrigation et de fertilisation azotée dans un contexte marqué par l'irrégularité de la pluie (Mellouli et al, 2007 ; Tilman et al, 2002). L'amélioration de ces efficacités pourrait être obtenue par des pratiques agricoles permettant l'accroissement des rendements et la réduction des pertes dans l'environnement (eau et air).

L'introduction de la quantité d'intrant (eau ou azote) permet une analyse stratégique des scénarios dans le nexus (Ringler et al, 2013) alimentation- eau-azote à partir de l'identité (Eq.2) c'est à dire la décomposition d'une performance (ici le rendement) en composants de base qui reste valable à toutes les échelles depuis la parcelle jusqu'au pays (Porter et Christensen, 2013).

$$\text{Rendement} \equiv \frac{\text{Production}}{\text{Intrant}} \times \frac{\text{Intrant}}{\text{Superficies } S} \times \frac{1}{\frac{\text{Superficies } R}{\text{Superficies } S}} \equiv \frac{\text{Production}}{\text{Intrant}} \times \frac{\text{Intrant}}{\text{Superficies } R} \quad (\text{Eq.2})$$

S : semées, R : récoltées

Cette entité permet d'analyser le rendement comme la combinaison d'un terme d'**efficience du système pour l'intrant** (par exemple Kg grain produit par Kg d'N apporté avec l'engrais) et d'un terme d'**intensivité en intrant** (par exemple quantité d'intrants par unité de surface allouée à l'activité de production de blé dur). Compte-tenu de l'importance des superficies non récoltées en grains certaines années, du moins dans les régions les plus sèches (Chapitre 1), l'intensivité en intrant est probablement sous-estimée car une partie des superficies semées mais non récoltées n'a probablement pas reçu d'engrais azoté. Par ailleurs une part significative des superficies non récoltées en grains est probablement utilisée pour le pâturage

des ovins en année très sèche. Mais une analyse plus poussée supposerait de disposer de données sur la part des engrais apportés au semis et de la production de biomasse dans les surfaces pâturées et non récoltées. Ne disposant pas de ce type de données nous utiliserons l'expression classique de l'identité avec l'intensivité par surface récoltée.

Afin d'analyser cette identité à l'échelle nationale, nous avons utilisé les données des statistiques nationales et régionales présentées au Chapitre 1. Toutefois, l'information sur les apports azotés n'étant disponible qu'à l'échelle nationale et pour toutes les céréales confondues, nous avons estimé la quantité d'azote apportée au blé dur, chaque année et dans chaque région, à partir des hypothèses suivantes :

- Toutes les quantités d'engrais azotés sont apportées seulement au blé dur et au blé tendre, sachant que la fertilisation azotée est similaire pour ces deux espèces de blé (Annabi et al, 2013).
- Les quantités d'engrais azotés apportées chaque année et dans chaque région au blé dur sont proportionnelles au rapport entre la production de blé dur et la production blé dur + blé tendre.

Pour les ressources hydriques, nous ne tenons compte que des apports hydriques par la pluie tombée entre le semis (entre Mi-Octobre et Mi-Décembre) et la récolte (entre Mi-Juin et Mi-Juillet), pour le blé dur conduit en pluvial (Latiri, 2000). La quantité d'eau disponible durant le cycle de blé a été considérée comme étant la somme des précipitations entre Septembre et Juin. Ces données ont été collectées de l'Institut National de la Météorologie, Tunisie (INM) (1.2, Chapitre 3).

1.2. Relation entre la production de blé dur et l'efficience des apports azotés

1.2.1. Efficience des apports azotés dans les systèmes céréaliers à base de blé dur

L'apport adéquat des nutriments et plus particulièrement de l'azote est un facteur majeur déterminant la production céréalière (Latiri-Souki, 1998). En effet, l'azote est un élément indispensable pour stimuler le tallage, la croissance foliaire, la photosynthèse et la synthèse des protéines (Karrou et al, 2001). Toutefois, l'azote est un élément qui subit des transformations rapides liées à la variation des températures et de l'humidité des sols. De ce fait, l'apport excessif des engrais azotés pourra engendrer la perte de cet élément par volatilisation ou par lixiviation au-delà de la zone racinaire. En plus de ces conséquences néfastes sur l'environnement, la forte augmentation récente du coût des engrais azotés rend la fertilisation azotée des cultures céréalières particulièrement sensible pour les producteurs sur le plan économique (Anbessa and Juskiw, 2012).

Au cours des dernières décennies, l'efficacité de l'azote pour la production céréalière exprimée par le ratio entre la production céréalière mondiale et l'application annuelle globale des engrais azotés, a sensiblement baissé à cause de l'utilisation massive des engrais azotés (Tilman et al, 2002). En Tunisie, l'utilisation des engrais minéraux a pris une place importante dans le processus d'intensification des systèmes céréaliers à base de blé dur. Dans les trois dernières décennies (1981-2013), les apports azotés ont sensiblement augmenté pour atteindre un maximum de 63 000 tonnes en 2012 soit une multiplication par 3 de la quantité qui était utilisée en 1980 (Figure 23.a). Cependant, cette consommation d'engrais azotés fluctue d'une année à l'autre. Au cours de la même période les rendements du blé dur ont été multipliés par 2 (Figure 23.b) avec cependant une forte variabilité interannuelle.

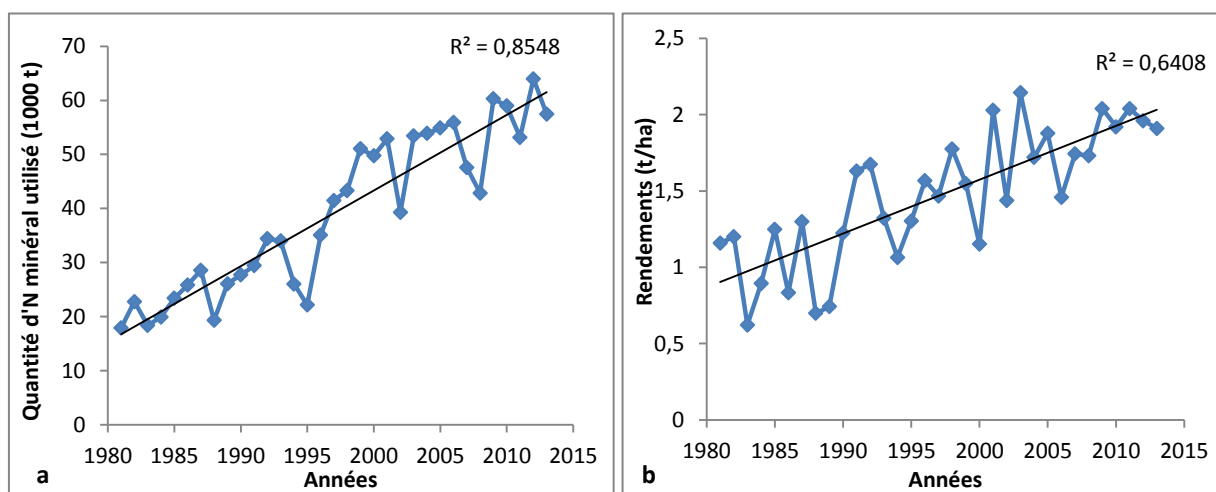


Figure 23. Evolution des apports d'engrais pour la production du blé dur (a) et des rendements de blé dur en Tunisie et (b) entre 1981 et 2013

Par conséquent, malgré l'augmentation des rendements du blé dur, l'efficacité de l'azote apporté à l'échelle nationale est très fluctuante (de 8 kg de grains/kg d'azote apporté en 1988 à 48 kg/kg obtenu en 1991 et 1996) (Figure 24). En effet, la variabilité des rendements est plus importante que celle des apports azotés. En trente ans l'efficacité des engrais azotés pour la production de blé dur a donc diminué de 0,53 kg/kg par an (Souissi et al, 2017).

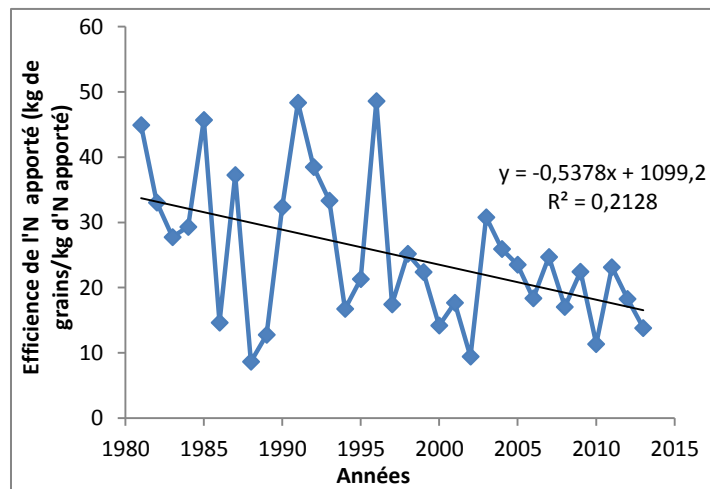


Figure 24. Evolution de l'efficacité de l'azote apporté pour la production du blé dur en Tunisie entre 1981 et 2013

1.2.2. Relation entre la production du blé dur et l'efficacité des apports azotés

Compte tenu de la nécessité d'augmenter la production de blé dur afin de répondre à la demande croissante de la population, il faut maximiser l'efficacité des apports azotés. Comme le montrent Tilman et al (2002), l'agriculture mondiale a connu au cours des dernières décennies (1960-2000), une augmentation forte des rendements céréaliers, nécessaire pour satisfaire les besoins nutritionnels d'une population mondiale en constante augmentation. Cet accroissement des rendements a été associé à une forte baisse de l'efficacité des apports azotés (Figure 25).

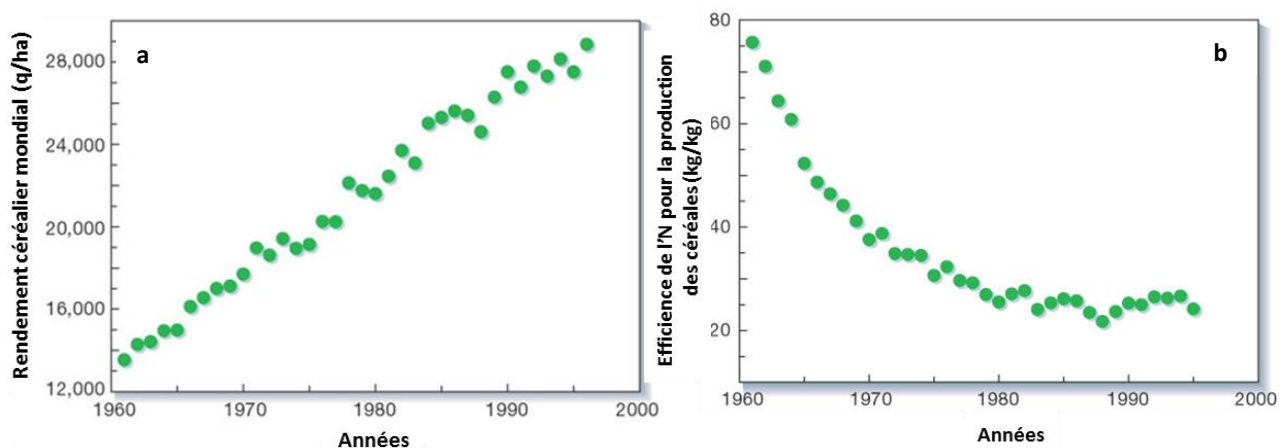


Figure 25. Evolution interannuelle des rendements moyens des céréales (a) et de l'efficacité des apports azotés pour la production des céréales dans le monde (b) (Tilman et al, 2002)

En Tunisie, la relation entre les rendements de blé dur et l'efficacité de l'azote apporté ne suit pas cette tendance globale et elle est caractérisée par une forte variabilité interannuelle (Figure 26.a) qui permet de distinguer quatre types de situations. La meilleure situation a été obtenue en 1991, avec un rendement de blé dur (1,67 t/ha) plus élevé que le rendement moyen enregistré au cours de cette période (1981-2013) et une forte efficacité de l'engrais azoté (48 kg/kg) (Figure 26.b). La deuxième (2 t/ha, 17 kg/kg en 2001) et la troisième situation (1,16 t/ha, 44 kg/kg en 1981), où une des deux variables est élevée et l'autre faible, sont les plus fréquentes en Tunisie. La dernière situation a été obtenue en 1988 (0,7 t/ha, 8 kg/kg), où les deux variables sont faibles.

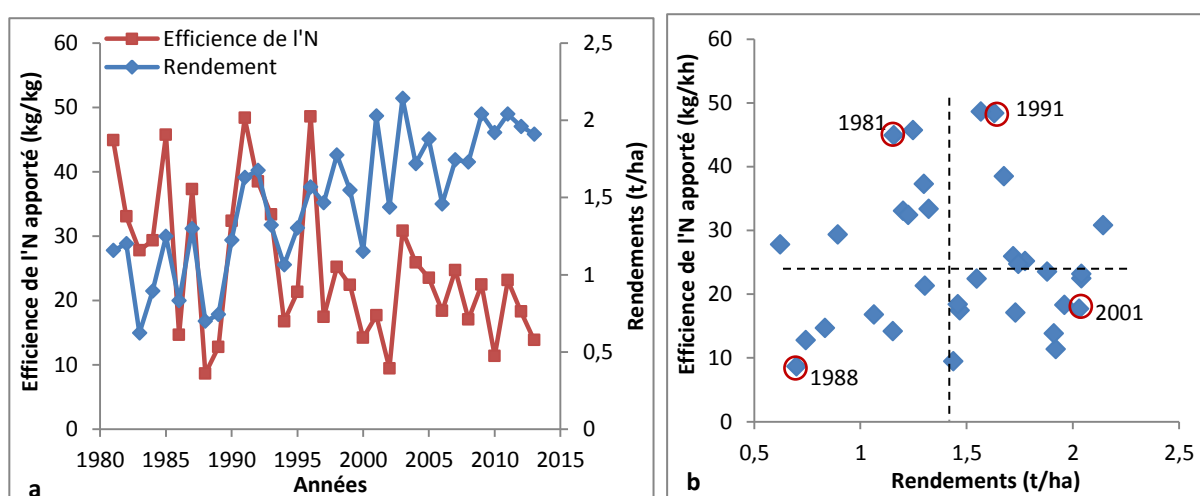


Figure 26. Variabilité des rendements de blé dur et de l'efficacité de l'azote apporté entre 1981 et 2013 (a) et relation rendement-efficacité (b)

1.3. Relation entre la production du blé dur et l'efficacité des apports hydriques

1.3.1. Efficacité de l'eau

Dans les régions arides et semi-arides, les précipitations faibles et irrégulières et la forte évapotranspiration limitent la production des cultures (Pala et al, 2007). Sous un climat méditerranéen, la variabilité des précipitations est à l'origine d'une extrême variabilité en production de céréales (Roxana et al, 2015). Cette variabilité inter-annuelle et saisonnière des précipitations affecte l'efficacité de l'utilisation de cette ressource limitée (Hochman et al, 2011). Cette efficacité a été définie comme étant le rapport entre le rendement ou la production en biomasse et la consommation en eau par évapotranspiration (Keating et al, 2010).

Le concept d'efficacité d'utilisation de l'eau de pluie a été utilisé dans l'analyse des systèmes céréaliers des terres arides de l'Australie. En établissant la relation entre le rendement du blé et la quantité d'eau de pluie tombée pendant le cycle de la culture, Passioura et Angus (2010) ont montré une grande variabilité des rendements et de l'efficacité qui s'explique, au-delà du facteur eau, par la présence d'autres facteurs limitant le rendement comme le manque d'azote, les maladies, les adventices et les chaleurs extrêmes. La droite des rendements limités seulement par l'eau, établie par Passioura et Angus (2010) pour le blé tendre (Figure 27), présente une pente de 20 kg grains/ha/mm ce qui correspond à 2 kg de grains/m³ d'eau.

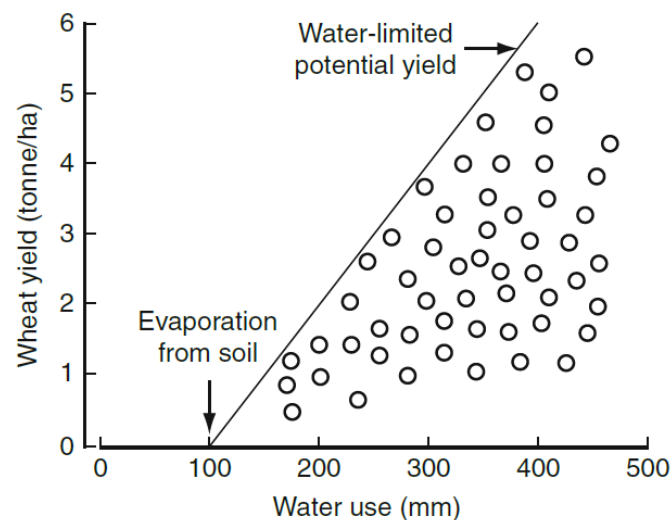


Figure 27. Représentation schématique du rendement du blé par rapport à l'approvisionnement saisonnier en eau (Précipitations pendant la saison de croissance plus l'eau disponible dans le sol au moment du semis). (Passioura et Angus, 2010)

Dans d'autres travaux réalisés en Tunisie sur l'efficacité de l'eau chez le blé dur cultivé en pluvial et en irrigué, Rezgui et al, 2005 ont montré que l'efficacité de l'eau en culture pluviale varie entre 0,57 kg de grains/m³ d'eau dans le semi-aride inférieur et 1,19 kg/m³ dans le subhumide. En condition d'irrigation, l'efficacité de l'eau est plus élevée qu'en pluvial, et varie entre 0,99 et 1,66 kg de grains/m³. Pour accroître l'efficacité de l'eau, en irrigué, un raisonnement des apports hydriques en tenant compte des stades phénologiques et de la réserve en eau du sol est indispensable pour réduire les pertes. Un déficit hydrique pendant la phase épiaison-début floraison peut entraîner une diminution de la surface foliaire et de la photosynthèse qui limitent le nombre de graines et la production de biomasse (Bhouri Khila et al, 2015). Un stress hydrique pendant la phase de remplissage de grains affecte aussi le rendement en grains mais à travers le poids des grains (Bhouri Khila et al, 2015).

Dans les systèmes céréaliers Tunisiens conduits en pluvial, les apports en eau par la pluie sont caractérisés par une irrégularité et une importante variabilité interannuelle et interrégionale (Figure 28.a). Dans les principales zones céréalières, la pluviométrie annuelle moyenne entre 1997 et 2012 varie de 650 mm (à Béja appartenant à l'étage bioclimatique subhumide) à 250 mm (à Sidi Bouzid appartenant à l'étage bioclimatique aride). En position intermédiaire, la pluviométrie annuelle moyenne dans les zones céréalières appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride comme Siliana est de 480 mm. La répartition des précipitations mensuelles calculées sur la période de 2002-2012, montre que la pluviométrie à Béja, a un cycle saisonnier fort avec les plus fortes pluies en hiver (entre 50 et 100 mm) et les plus faibles en Juin et Juillet. A Siliana, la pluviométrie mensuelle suit la même tendance, mais avec des valeurs plus faibles. Dans la région de Sidi Bouzid, les pluies sont réparties de façon plus régulière mais elles ne dépassent pas 40mm par mois (Figure 28.b).

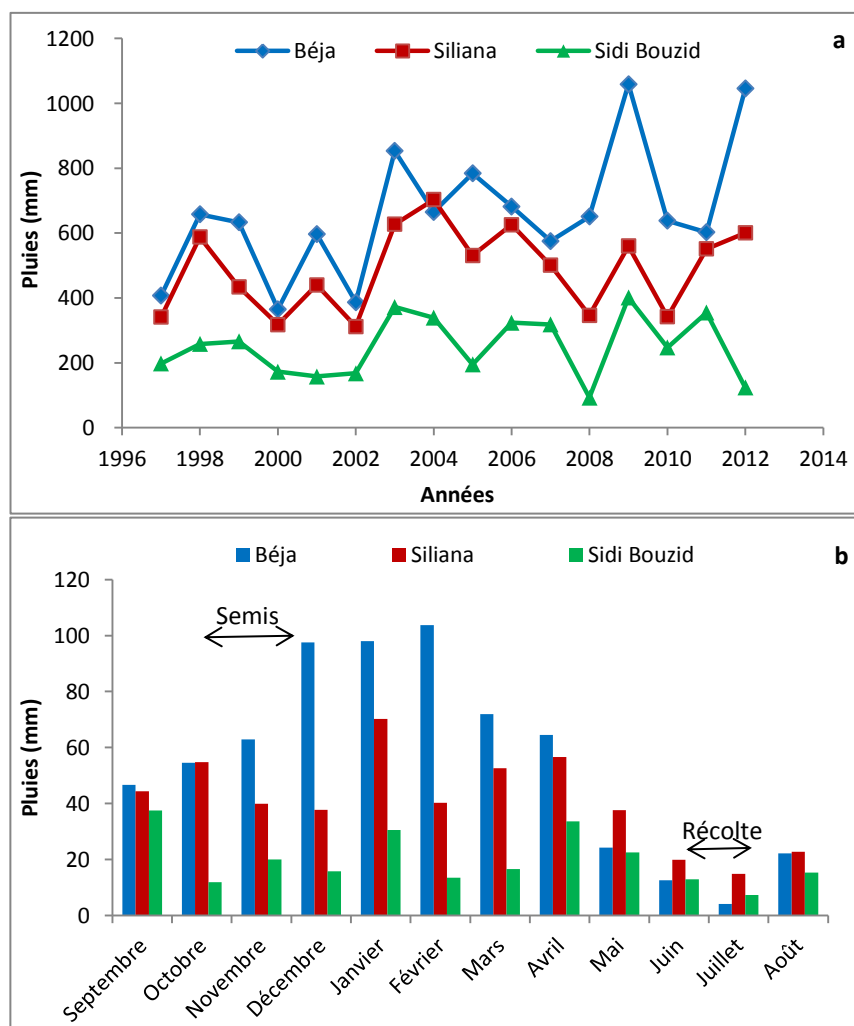


Figure 28. Evolution des pluviométries annuelles durant les années agricoles (Septembre-Aout) 1996/1997-2011/2012 (a) et répartition des pluies mensuelles moyennes calculées sur la période de 2002-2013 (b), pour les trois régions de Béja, Siliana et Sidi Bouzid

En Tunisie, la relation entre les rendements de blé dur et la pluviométrie de la période comprise entre Septembre et Juin pour les années 2003 à 2012 montre une variabilité des réponses de blé dur à l'eau en fonction de la région (Figure 29.a). Dans la région de Béja, les rendements maximums peuvent être atteints avec de fortes pluies ou de faibles pluies pendant le cycle cultural. Ceci explique une mauvaise valorisation des pluviométries élevées, qui entraîne une baisse de l'efficacité de l'eau. Lorsque l'eau n'est plus limitante, d'autres facteurs comme l'azote sont alors limitants et empêchent l'utilisation efficiente de l'eau de pluie dans les systèmes conduits en pluvial.

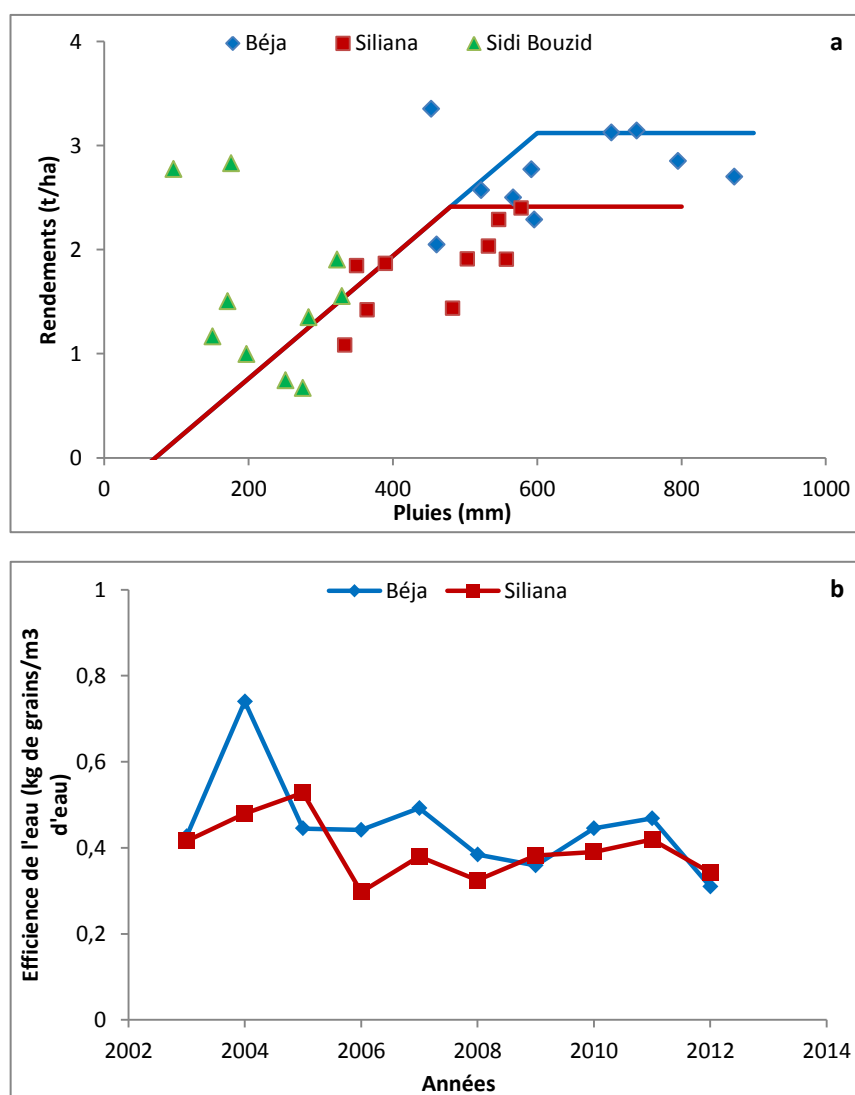


Figure 29. Relation entre les pluies et les rendements de blé dur cultivé en pluvial dans les régions de Béja, Siliana et Sidi Bouzid (a) et variabilité de l'efficacité de l'eau de pluie dans les régions de Béja et Siliana (b) pour la période comprise entre Septembre et Juin pour les années de 2003 à 2012

Dans cette région, l'efficacité de l'eau de pluie montre une légère tendance à la baisse au cours des années et varie d'un maximum de 0,74 kg/m³ obtenu en 2004 à un minimum de 0,31 kg/m³ obtenu en 2012 (Figure 29.b). Dans la région de Siliana appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride supérieur, une relation linéaire a été mise en évidence entre le rendement et les apports hydriques. Dans cette région, l'efficacité de l'eau de pluie fluctue entre 0,3 et 0,5 kg/m³ avec une tendance à la stagnation. Dans la région de Sidi Bouzid appartenant à l'étage bioclimatique aride, des rendements élevés ont été obtenus avec des apports hydriques très faibles. En effet, dans les années sèches, le faible pourcentage des superficies récoltées par rapport aux superficies semées fait augmenter artificiellement le ratio production sur superficies récoltées qui est le rendement. Dans ce cas, on ne peut pas discuter de l'efficacité de l'eau.

1.3.2. Relation entre la production du blé dur et l'efficacité de l'eau

Comme pour l'azote, la relation entre les rendements de blé dur et l'efficacité de l'eau montre une grande variabilité dans les deux régions de Béja et Siliana (Figure 30). En revanche, la différence entre les deux régions est nette. En effet, à chaque niveau d'efficacité, les rendements sont plus élevés dans la région de Béja, ce qui induit un meilleur compromis production-efficacité dans cette région. Ceci pourrait s'expliquer par l'effet de la répartition des pluviométries (Figure 28.b) ou par des conditions pédoclimatiques comme l'évaporation du sol ou d'autres facteurs liés à la fertilité des sols.

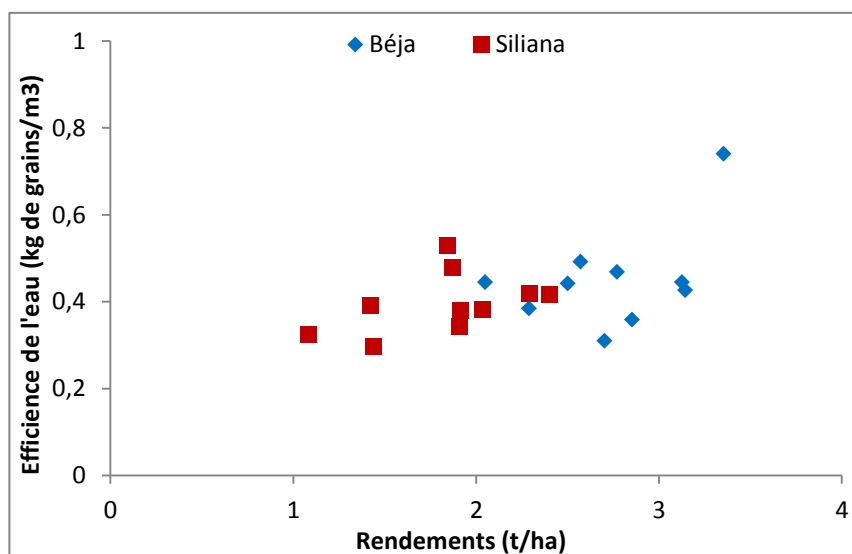


Figure 30. Relation entre les rendements du blé dur et l'efficacité de l'eau de pluie pour la période comprise entre Septembre et Juin pour les années 2003 à 2012

En conclusion, l'efficacité de l'azote pour la production de blé dur en Tunisie a baissé au cours du temps avec l'augmentation des apports azotés. Toutefois, cette efficacité a été caractérisée par une forte variabilité interannuelle qui a été à l'origine de la variabilité de la production. De même pour l'efficacité de l'eau de pluie qui était très fluctuante au cours des années. Par conséquent, il était difficile de définir un compromis entre les rendements de blé dur et l'efficacité de l'eau et de l'azote. Ceci pourrait être dû aussi au fait que l'analyse a été faite à l'échelle nationale, avec des données issues des statistiques nationales et d'autres calculées (N apporté). A l'échelle de la parcelle, la relation entre les rendements (ou production) et l'efficacité de l'eau et de l'azote peut nous permettre de définir un compromis permettant d'identifier des stratégies pour augmenter à la fois la production et l'efficacité des intrants.

2. Problématique de la thèse et hypothèses scientifiques

La faible efficacité des ressources non renouvelables comme l'eau et l'azote, constitue un frein à un accroissement durable de la production de blé dur en Tunisie. Augmenter cette efficacité en même temps que le rendement est donc une voie majeure d'amélioration de la durabilité des cultures de blé dur car cela permet d'accroître la production alimentaire tout en diminuant les impacts environnementaux associés au prélèvement de l'eau, à la synthèse des engrais (consommation d'énergie fossile) et à l'émission de l'azote vers l'eau ou l'air. C'est ce que Keating et al (2010) appellent une agriculture éco-efficace permettant une production de blé dur écologiquement et économiquement efficace. En ce sens, l'éco-efficacité vient apporter une clé d'analyse au concept d'intensification agro-écologique (Cassman, 1999 ; Dobermann et al, 2008), tout en reliant performances et intrants des systèmes. Toute mesure de l'éco-efficacité implique de définir des fonctions de production qui définissent des frontières d'efficacité propres à chaque système de culture. Ces frontières d'efficacité permettent notamment de comparer les efficacités des systèmes de cultures et d'analyser les écarts de rendement (« yield gap ») (Van Ittersum et al. 2013). Dans ses travaux entrepris sur l'efficacité de l'utilisation des ressources en agriculture, De Wit (1992), a proposé de décomposer l'efficacité totale d'un système en deux termes, l'efficacité de la capture de la ressource et l'efficacité de la conversion biologique de la ressource en introduisant l'azote absorbé comme une variable intermédiaire entre les apports azotés et le rendement. La combinaison de cette approche avec celle de Keating et al (2010) permet d'ouvrir une piste de réflexion sur les mécanismes permettant d'améliorer l'éco-efficacité globale d'un système en

généralisant par la génétique ou par les systèmes de culture une nouvelle frontière d'éco-efficience. En se référant à ce concept, l'hypothèse qu'on a définie **1)** est que la diversification des successions culturales permet d'obtenir des nouvelles frontières d'efficience pour la captation de la ressource et sa conversion en grains de blé dur. Pour tester cette hypothèse, nous proposons de décomposer la frontière d'efficience d'azote afin ;

- D'analyser l'effet d'un précédent cultural non céréalié sur la captation et la conversion de la ressource azotée et sur leurs efficacités qui représentent respectivement, le ratio des quantités d'azote absorbé sur les apports d'engrais azotés et le ratio des rendements en grains sur les quantités d'azote absorbé.

Dans le cas où on a plusieurs agriculteurs qui produisent du blé dur avec des pratiques culturales et dans des conditions pédoclimatiques différentes, les performances (azote absorbé, rendement) observées au niveau des parcelles seront positionnées différemment par rapport aux frontières d'efficience de captation et de conversion de la ressource. En ce sens, la deuxième hypothèse qu'on a définie est **2)** que l'introduction de précédents culturaux diversifiés pourrait lever tous les facteurs limitant la production et l'absorption azotée, permettant de réduire les écarts aux frontières d'efficience. Ceci nous amène à :

- Analyser les écarts de rendement et d'absorption de l'azote par rapport à la frontière d'efficience en se basant sur le concept de « yield gap » (Van Ittersum et al, 2013).

Dans des conditions méditerranéennes, la production de blé dur est fréquemment soumise à des pluies saisonnières insuffisantes et irrégulières. De ce fait, l'eau est le principal facteur qui limite le potentiel de rendement de blé et de sa réponse à l'azote (Garabet et al, 1998). En se basant sur les concepts d'éco-efficience, de facteur limitant et de décomposition de l'efficience, nous proposons de tester notre hypothèse qui est **3)** que les systèmes de rotation avec des cultures diversifiées permettraient d'améliorer le potentiel de captation et de conversion de la ressource hydrique et leurs efficacités qui représentent respectivement le ratio des quantités d'eau transpirée sur les apports hydriques et le ratio des rendements de blé dur sur les quantités d'eau transpirée. Suivant la même démarche pour l'azote, nous proposons :

- D'analyser l'effet du précédent cultural sur les réponses de blé dur à l'eau et sur la captation et la conversion de la ressource hydrique.

L'eau et l'azote sont liés de plusieurs façons. Dans cette étude, on fait l'hypothèse que **4)** l'interaction entre l'eau et l'azote pourrait avoir un effet sur la production et l'efficacité de ces intrants. Ceci nous amène à :

- Analyser les interactions entre l'eau et l'azote en se basant sur les frontières d'efficacité établies pour chaque intrant et sur les écarts d'absorption hydrique et azoté.

L'analyse interannuelle de l'évolution de la production céréalière en Tunisie (chapitre 1) et de l'efficacité des intrants pour la production de blé dur (chapitre 2) en Tunisie nous a montré que les rendements de blé dur demeurent nettement en deçà des potentialités et des besoins du pays, alors que l'efficacité de l'azote a diminué au cours du temps. De ce fait, un des défis des systèmes céréaliers Tunisiens est le développement des pratiques culturales simples permettant d'améliorer le niveau de rendement de blé dur, maximiser l'efficacité de l'utilisation des ressources et de réduire les impacts environnementaux. En ce sens, on fait l'hypothèse que l'introduction des cultures diversifiées, permettrait d'obtenir un nouveau compromis entre la production de blé dur et l'efficacité de l'utilisation d'azote. Pour tester cette hypothèse nous proposons:

- D'analyser l'effet du précédent cultural sur les relations entre l'efficacité d'azote et les rendements/les apports azotés.
- D'analyser à partir des compromis entre la production et l'efficacité des scénarios dans le nexus superficie-intrants-production alimentaire.

3. Stratégie de recherche

La démarche de travail repose sur les trois étapes suivantes (Figure 31):

1. Formaliser un cadre conceptuel permettant de tester les hypothèses précédentes en se basant sur les concepts de facteur limitant (Passioura et Angus, 2010), d'écart de rendement (Van Ittersum et al, 2013), de la frontière d'éco-efficacité (Keating et al, 2010) et de la décomposition de l'efficacité des ressources (De Wit et al, 1992). Ce cadre d'analyse va nous permettre, dans une première étape, d'analyser l'effet des rotations sur les frontières d'efficacité de captation et de conversion de la ressource. En utilisant ces frontières d'efficacité, ce cadre permet d'établir des courbes enveloppes des compromis entre les rendements et l'efficacité des intrants. En utilisant des données expérimentales de l'ICARDA où toutes les variables ont été mesurées, ce cadre d'analyse sera testé pour l'azote. Il

permettra aussi un premier test de l'hypothèse 1. La formalisation du cadre conceptuel et son test avec des données expérimentales mesurées fera l'objet du chapitre 4.

2. Elaborer une base de données permettant de tester nos hypothèses dans des parcelles d'agriculteurs en Tunisie. Les données nécessaires pour l'analyse des compromis entre la production et l'efficacité de l'azote ont été déduites du cadre conceptuel. L'ensemble des données collectées à l'échelle de la parcelle est issu des enquêtes entreprises auprès des agriculteurs sur 576 situations agronomiques dans 4 régions qui fournissent une partie importante de la production céréalière et répartis comme suit: 182 à Jendouba, 62 à Siliana, 198 à Kairouan et 134 dans le bassin versant de Lebna. Dans ce cas, une situation agronomique est définie comme étant la combinaison d'une parcelle de blé dur, une année et un précédent cultural. D'autres données difficiles à obtenir auprès des agriculteurs, ont été collectées des expérimentations dans des travaux publiés sur le blé dur en Tunisie ou dans d'autres pays de la méditerranée. La description des données collectées à différentes échelles et de différentes sources fera l'objet du chapitre 3.

3. Utiliser le cadre conceptuel pour analyser les compromis entre la production et l'efficacité de l'azote et de l'eau pour le blé dur en parcelles agricoles en Tunisie. Pour ce faire, nous utiliserons les données collectées auprès des agriculteurs et de la bibliographie. L'application du cadre nous permettra d'analyser les frontières d'efficacités en fonction du précédent cultural et aussi les écarts d'absorption d'azote. Cette partie sera présentée dans le chapitre 5. Pour l'analyse des compromis entre l'efficacité de l'eau et la production de blé dur en Tunisie qui fera l'objet du chapitre 6, nous ferons une première tentative en suivant la même démarche pour l'azote, en remplaçant l'azote apporté par les apports hydriques et l'azote absorbé par la transpiration. Toutefois, il sera un chapitre méthodologique permettant de présenter la démarche pour l'eau.

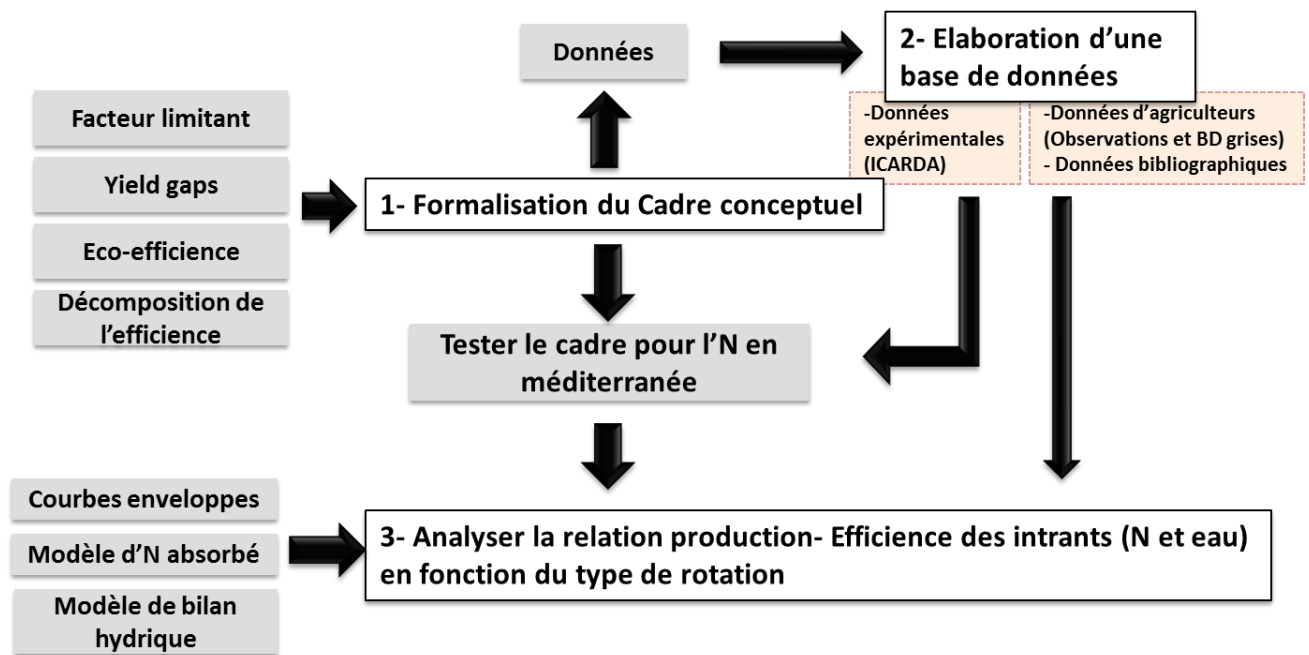


Figure 31. Schéma récapitulatif de la démarche globale

Chapitre 3 : Les données collectées

Objectifs du chapitre

Ce chapitre sera consacré pour la description des données collectées pour répondre aux objectifs de la thèse. Ces données ont été collectées ont été groupées selon l'échelle (nationale, régionale, exploitation, parcelle) et la source (enquêtes, statistiques régionales et nationales, expérimentation, bibliographie).

1. Données collectées à l'échelle nationale et régionale

1.1. Statistiques nationales et régionales

Afin d'analyser la variabilité interannuelle de la production céréalière en Tunisie (Chapitre 1) et d'étudier le blé dur dans le nexus alimentation-eau-azote (Chapitre 2), nous avons utilisé une base de données sur les statistiques nationales et régionales de la production céréalière en Tunisie, obtenue auprès de la direction générale de la production agricole (DGPA), Ministère de l'agriculture, des ressources hydrauliques et de la pêche-Tunisie. Il s'agit de données sur les trois principales céréales cultivées en Tunisie (Blé dur, Blé tendre et Orge) qui couvrent des informations sur : les superficies semées (ha), les superficies récoltées (ha), la production (t/an), le rendement (t/ha) et les apports annuels d'azote, toutes céréales confondues à l'échelle nationale (Annexe 1). Ces données ont été classées en trois sous-groupes :

- Des données globales (tous mode de conduite confondus: irrigué et pluvial) obtenues à l'échelle nationale et régionale (dans les 24 gouvernorats) (Figure 1) pour chaque céréale et pour chaque année entre 1980 et 2013.
- Des données nationales et régionales sur les céréales conduites en pluvial entre 1980 et 2012.
- Des données nationales et régionales sur les céréales conduites en irrigué entre 2000 et 2013.

1.2. Données climatiques

Les données climatiques utilisées dans notre étude sont principalement des données pluviométriques sur l'année agricole (de Septembre à Aout) pour les toutes les régions Tunisiennes et des données climatiques journalières. Les données pluviométriques annuelles ont été fournies par l'institut national de la météorologie, Tunisie (INM) entre 1997 et 2012. Les données climatiques journalières ont été fournies par l'institut national de génie rural, eau et forêt (INRGREF). Il s'agit de données sur la pluviométrie, les températures (minimales et maximales) et la durée d'insolation qui ont été obtenues sur la période de 2002-2013 pour toutes les régions Tunisiennes et seulement pour les trois régions céréalières de Jendouba,

Siliana et Kairouan sur les années 1989-1995 (Figure 32). Ces données nous ont permis de calculer les pluviométries mensuelles et par saison (automnales, printanières) qui ont été utilisées dans l'analyse de la variabilité des superficies semées et récoltées (Chapitre 1). Les données climatiques journalières étaient destinées au paramétrage du modèle de bilan hydrique permettant de calculer la quantité d'eau transpirée par la culture de blé dur au niveau des parcelles d'agriculteurs (travail non réalisé dans le cadre de cette thèse).



Figure 32. Carte de découpage en gouvernorats de la Tunisie

2. Données collectées à l'échelle de la parcelle

Afin d'analyser les compromis entre la production et l'efficacité des intrants à l'échelle de la parcelle nous avons utilisé des données collectées auprès des agriculteurs et d'autres issues des travaux publiés permettant de tester la cohérence du cadre d'analyse (Chapitre 4).

2.1. Données collectées auprès des agriculteurs

L'ensemble des données collectées est issu des enquêtes réalisées, par moi ou par d'autres, auprès des agriculteurs sur 537 situations agronomiques (c'est à dire la combinaison d'une parcelle de blé dur, une année et un précédent cultural) dans 4 régions qui fournissent une

partie importante de la production céréalière et réparties comme suit : 162 à Jendouba qui est située au Nord-Ouest de la Tunisie, à un étage bioclimatique subhumide, 60 à Siliana au Centre semi-aride supérieur, 187 à Kairouan au Centre semi-aride inférieur et 128 dans le bassin versant de Lebna, à Nabeul, qui est situé au Nord-Est de la Tunisie (Figure 33). Les trois premières régions sont caractérisées par une pluviométrie annuelle moyenne de 500, 420 et 320 mm respectivement (Rezgui et al, 2005). Dans le bassin versant de Lebna, le climat varie du subhumide à l'extrême amont du bassin, avec des précipitations moyennes de 600 mm/an, au semi-aride sur la partie Est, avec des précipitations inférieures à 500 mm/an (Bortoli et al, 1969).

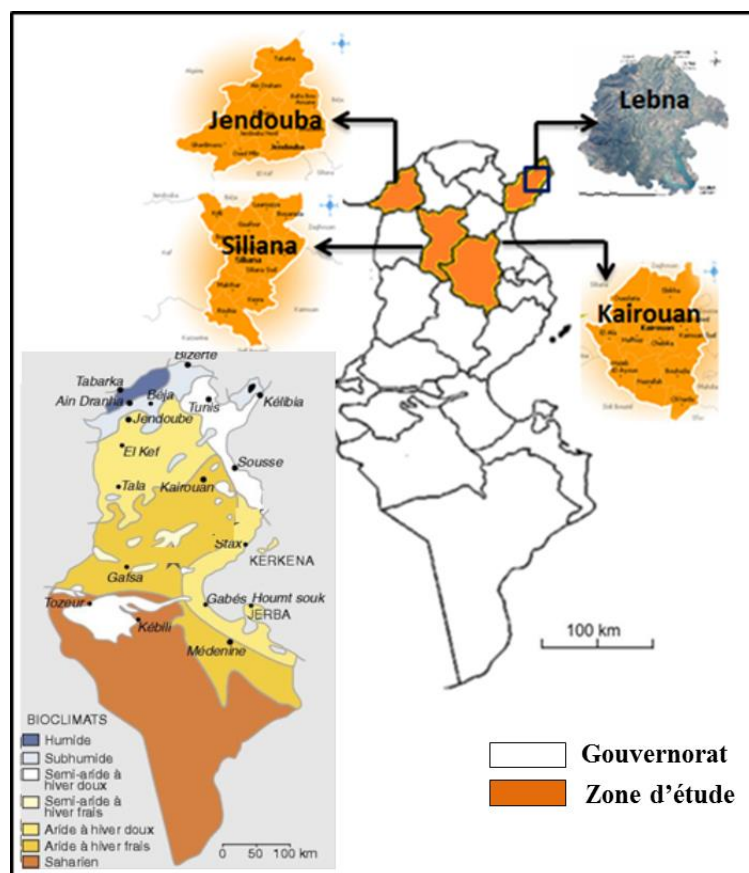


Figure 33. Présentation des quatre régions céréalières : Jendouba, Siliana, Kairouan et le bassin versant de Lebna et de leurs étages bioclimatiques

L'ensemble de ces données est le résultat de la combinaison de trois jeux de données (Annexe 2) issus des enquêtes réalisées auprès d'agriculteurs représentatifs de la diversité des pratiques agricoles (rotation, apport azoté, mode de conduite) et des conditions pédoclimatiques. Le premier représente le résultat d'une enquête réalisée par l'institut national agronomique de Tunis (INAT) dans des périmètres irrigués au niveau des régions de Jendouba (47), Siliana

(60) et Kairouan (75), durant 7 campagnes consécutives allant de 1988/1989 à 1994/1995. Le deuxième jeu de données est le résultat d'une enquête réalisée par l'institut national des grandes cultures à Boucelem (INGC) sur des parcelles de blé dur en pluvial à Fernena (115), dans la région de Jendouba et des parcelles conduites en irrigué à Chebika (112), dans la région de Kairouan. Ces enquêtes ont été réalisées auprès des agriculteurs au cours de la campagne 2011/2012. Pour avoir une diversité des pratiques agricoles (principalement des rotations) plus importante, notamment pour le blé conduit en pluvial, nous avons réalisé des enquêtes auprès des agriculteurs du bassin versant de Lebna. Dans cette région, nous avons interrogé (Annexe 3) un échantillon de 40 agriculteurs distribués sur tout le bassin versant, avec un échantillonnage par la méthode « boule de neige » (Neuchâtel, 2014). Chaque agriculteur a été enquêté sur toutes ses parcelles de blé dur (une seule, deux ou plus) qui avaient le même itinéraire technique mais des précédents culturels différents. A partir de cet échantillon, nous avons constitué un troisième jeu de données sur 68 et 60 situations agronomiques dans des exploitations conduites en pluvial pour les saisons 2012/2013 et 2013/2014 respectivement.

A partir de cet ensemble de données, nous avons utilisé les données de 243 situations agronomiques (conduites en pluvial), dont 115 sont à Fernena (Jendouba) et 128 au bassin versant de Lebna (Nabeul) pour analyser les compromis entre la production et l'efficacité de l'azote pour la production de blé dur en pluvial (Chapitre 5). Pour l'analyser des réponses de blé dur à l'eau et à l'azote en fonction du type de rotation, nous avons utilisé les données de 182 situations agronomiques (parcelles irriguées) dont le précédent culturel et le volume d'eau d'irrigation étaient connus.

L'ensemble des données collectées couvrent essentiellement des informations relatives aux rendements (en grains et en paille), aux variables climatiques, aux apports azotés et aux différentes composantes de l'itinéraire technique. Le détail des informations quantitatives et qualitatives recueillies sur chaque parcelle de blé dur est présenté dans le tableau 4 et est disponible en format Excel.

Tableau 4. Récapitulatif des données collectées sur des parcelles de blé dur

Type	Description		
	BD_1 (88/89-94/95)	BD_2 (2011/2012)	BD_3 (12/13-13/14)
Régions	Jendouba, Siliana, Kairouan	Jendouba, Kairouan	Nabeul
Rendement	-Rendement en grains (q/ha) - Rendement en pailles (balles)	- Rendement en grains (q/ha) - Rendement en pailles (balles)	- Rendement en grains (q/ha) - Rendement en pailles (balles)
Variables climatiques	-Pluviométrie bimensuelle d'Octobre à Mai (mm) -Température maximale et minimale décadaire d'Octobre à Mai (°C) -Rayonnement global bimensuel d'Octobre à Mai (Cal/cm2)	- Pluviométrie annuelle (mm)	<u>Station de Kamech (au nord du bassin)</u> (ORE OMERE) -Pluviométrie journalière -Température maximale et minimale journalière -Evapotranspiration de référence journalière calculée selon la formule de la FAO-56 (mm/j) -Vitesse du vent (m/s) -Rayonnement global journalier (Cal/cm2) <u>Station de Lebna (au sud du bassin)</u> - Pluviométrie journalière
Fertilisation azotée	-Quantité d'N apporté (kg/ha) - Nombre d'apports - Engrais azoté : Ammonitrate33%	-Quantité d'N apporté (kg/ha) -Engrais azoté : Ammonitrate33% et DAP 18%	- Quantité d'N apporté (kg/ha) - Nombre d'apports - Quantité d'N par apport (kg/ha)

			-Engrais azoté : Ammonitrate 33% et DAP 18% - Dates d'apport
Précédent cultural - Céréales (y compris blé dur) - Cultures Maraîchères - Jachère - Cultures Fourragères (Légumineuses+ Céréales) - Betterave sucrière	- Céréales (y compris blé dur) - Cultures Maraîchères - Légumineuses Alimentaires - Jachère	- Céréales (y compris blé dur) - Cultures Maraîchères - Légumineuses Alimentaires - Légumineuse Fourragères	
Conduite Irrigué	Pluvial (à Jendouba) Irrigué (à Kairouan)	Pluvial	
Date de semis Du 01/11 au 15/12		Du 01/11 au 01/12	
Autres ITK -Irrigation : Volume d'eau (mm), Mode d'irrigation, Date et Nombre d'irrigations. - Fertilisation phosphatée : Quantité de P (kg/ha), Engrais : Super phosphate (45%) - Dose et mode de semis - Variété : Karim, Razek et Khiair - Date de désherbage	-Fertilisation phosphatée : Quantité de P (kg/ha), Engrais : Super phosphate 45%et DAP 46% - Variété : Maali	-Fertilisation phosphatée : Quantité de P (kg/ha), Engrais : Super phosphate 45% et DAP 46% - Dose et mode de semis - Date de récolte - Variété : Karim, Razek, Maali et Nasr - Protection phytosanitaire : Date et cible	

2.2. Données expérimentales issues d'un essai variétal mis en place à Mauguio

Afin de paramétrer, pour les variétés de blé dur les plus utilisées par les agriculteurs tunisiens (Karim, Razzek, Maali et Nasr), le modèle SSM (Soltani et al, 2013) permettant de calculer les quantités d'eau évaporées et transpirées dans chaque situation agronomique, un dispositif expérimental (Figure 34) a été mis en place au sein d'un essai variétal de l'UE INRA Diascope de Mauguio (Annexe 4). Cet essai a également fourni les données pour estimer les paramètres du modèle d'estimation de l'azote absorbé pour ces 4 variétés (2.3, Chapitre 4). Le dispositif expérimental comportait 4 parcelles élémentaires de 7,5 m² (1,5m×5m) avec chacune une variété de blé dur. Quatre placettes de 0,25 m² (0,5m×0,5m) ont été identifiées dans chaque parcelle pour mesurer les composantes du rendement.

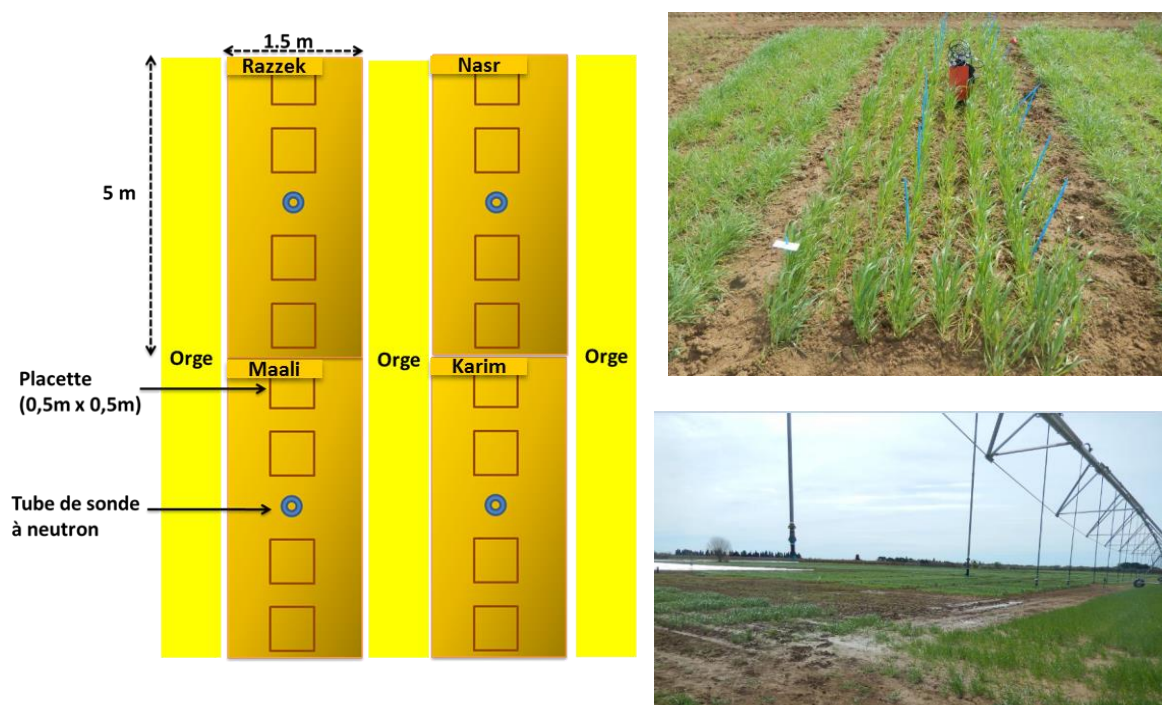


Figure 34. Dispositif expérimental réalisé sur quatre variétés Tunisiennes de Blé dur

Variables mesurées au cours du cycle

- L'humidité du sol a été mesurée une à 2 fois par mois tout au long du cycle, via une sonde à neutron de 20 cm à 140 cm de profondeur avec une mesure tous les 20 cm. Les tubes de sonde à neutron ont été implantés au centre de chaque parcelle élémentaire (Figure 34).
- Des données climatiques journalières ont été fournies par la station météo de Mauguio (base de données CLIMATIK de l'Inra) : Pluviométrie, Températures maximales et minimales, Rayonnement global.

- Les dates des différents stades de développement de la culture de blé dur.
- L'efficacité du rayonnement intercepté (RIE) a été mesurée une à 2 fois par mois à partir du 06 Mars jusqu'à la date de récolte, avec un capteur de lumière de type LI-191-Line Quantum Sensor (barre linéaire de mesure) qui a été branché à un boîtier LI-1400 DattaLogger. Ce capteur a été placé à la fois en dessus et en dessous du couvert et perpendiculairement aux rangs de blé.

Variables mesurées à maturité

- Le rendement en grains et en pailles (poids frais et teneur en eau), permettant de calculer le poids sec (après séchage à l'étuve à 60 °C pendant 48 heures) (Hily et al, 2007) et l'indice de récolte (IR).
- La teneur en azote des grains et des pailles mesurée au laboratoire des analyses des eaux, sols et végétaux du CIRAD. Ces analyses de N total ont été réalisées par combustion sèche suivant la méthode Dumas, en utilisant un analyseur élémentaire LECO Trumac N.

Les résultats des mesures de biomasse et de teneur en azote des grains et des pailles sont donnés dans le tableau 5. Ces mesures montrent qu'il n'y a pas de différences significatives au niveau des teneurs en azote et des indices de récolte en biomasse (IR) et en azote (NHI) entre les quatre variétés.

Tableau 5. Moyennes des biomasses (en matière sèche, MS) en grains et en pailles, des teneurs en azotes des grains (Ng) et des pailles (Np) et des indices de récolte correspondants (HI et HIN) pour les quatre variétés Tunisiennes de blé dur cultivées à Mauguio

	Grain		Paille		Indice de Récolte	
N=16	MS (kg/ha)	Ng (%)	MS (kg/ha)	Np (%)	HI	NHI
Maali	5468	2,19	4576	0,52	0,54	0,83
Razek	4802	1,95	3545	0,44	0,58	0,86
Nasr	5688	2,02	4601	0,45	0,55	0,85
Karim	4197	2,09	3218	0,51	0,56	0,84
Moyenne	5039	2,06	3985	0,48	0,56	0,84
CV (%)	13.42	5,01	17,81	8,08	2,55	1,10

2.3. Données collectées dans la bibliographie

Données de l'ICARDA

Afin de tester le cadre d'analyse de l'efficacité de l'azote dans le cas de blé dur en méditerranée (Chapitre 4), nous avons utilisé des données expérimentales publiées sur des expérimentations réalisées à la station de l'ICARDA à Tel Hadya au nord de la Syrie (Harris, 1990 ; Ryan et al, 2008). Dans cette région, la production agricole est soumise à des pluies saisonnières faibles et irrégulières qui varient de 200 à 600 mm (Cooper et al, 1987). Le sol dominant est un Rhodoxeralf calcique (Harris, 1990) avec une texture argileuse et une teneur en matière organique entre 0,8 à 1% (Ryan et al, 2008). La plupart des sols de cette zone sont de 1 à 2 m de profondeur, mais il existe dans quelques parcelles, des sols avec moins de 0,5 m de profondeur. Des données sur la matière sèche en grains et en pailles du blé dur, soumis à quatre traitements azotés et cultivé dans sept types de rotation biannuelle ont été collectées entre 1985/1986 et 1988/1989 (Annexe 5). Au cours de ces années, la variété de blé dur améliorée Sham 1 était semée mi-Novembre. La teneur en azote des grains et des pailles, pour chaque combinaison de niveaux d'apports azotés et de précédent cultural, a été mesurée entre 1989-1990 et 1997-1998. Pour ces derniers, nous avons utilisé la valeur moyenne de chaque combinaison, afin de déterminer la quantité d'azote absorbée. La base de données résultante contient des informations sur 112 situations agronomiques définies ici comme la combinaison d'une parcelle, une année, un précédent cultural et un traitement azoté. Le détail des informations recueillies sur ces parcelles expérimentales de blé dur est présenté dans le tableau 6.

Tableau 6. Données expérimentales publiées issues des expérimentations réalisées à la station de l'ICARDA à Tel Hadya

Variables mesurées	Années	Référence	Traitement azoté (kg/ha)	Précédent cultural
- Biomasse (grain et paille)	-1986/1989	- Harris, 1990	0	Jachère
			30	Pastèque
			60	Lentille
- Teneur en azote (grain et paille)	-1990/1998	- Ryan et al, 2008	60	Pois chiche
			90	Vescs
				Luzerne
				Blé

Autres données publiées

Il s'agit de données expérimentales issues d'expérimentations sur le blé dur en Tunisie dans des régions méditerranéennes (Italie, Espagne...) ou d'autres régions du monde (Inde, Mexique...) (Tableau 7). Les variables collectées (Tableau 8) sont la biomasse (en matière sèche, MS) en grain et en paille, la teneur en azote des grains (Ng) et des pailles (Np), l'indice de récolte (HI) et l'indice de récolte en azote (NHI). Ces données nous ont permis avec les données expérimentales des quatre variétés Tunisiennes (Tableau 5) de paramétrer le modèle d'estimation de l'absorption de l'azote (2.3, Chapitre 5).

Tableau 7. Données bibliographiques

Pays	Nombre de parcelle	Année	Traitement	Reference
Espagne	12	1996, 1997 and 1998	- N apporté	López-Bellido et López-Bellido, 2001
Tunisie	6	2009 and 2010	- N apporté	Ayadi et al, 2014
Italie	6	1999 and 2000	- N apporté	Giorgio et Montemurro, 2006
Inde	10	1975	- Variété	Desai et Bhatia 1978
Mexique	18	1995 and 1996	- N apporté - Variété - Irrigation	Ottman et al, 2000
Californie	10	1993	- N apporté - Variété	Ehdaie et Waines, 2001
Tunisie	4	2013	- Fractionnement des apports d'N	Melki et al, 2015

Tableau 8. Moyennes des biomasses (MS) en grains et en pailles, des teneurs en azote des grains (Ng) et des pailles (Np) et des indices de récolte correspondants (HI et HIN) pour les quatre variétés Tunisiennes de blé dur cultivées à Mauguio

	Grain		Paille		Indice de Récolte	
N=66	MS (kg/ha)	Ng (%)	MS (kg/ha)	Np (%)	HI	NHI
Moyenne	4457	2,16	7738	0,47	0,39	0,76
CV (%)	47,01	13,46	39,95	39,63	13,45	11,79

Chapitre 4 : Cadre d'analyse des compromis entre l'efficience des intrants et la production : cas de l'azote dans un système céréalier méditerranéen

Objectifs du chapitre

En se basant sur les concepts de frontière d'éco-efficience (Keating et al, 2010) et de décomposition de l'efficience (De Wit, 1992), nous proposons un cadre d'analyse des compromis entre la production et l'efficience des intrants, permettant l'utilisation de données accessibles au niveau des parcelles expérimentales. L'objectif de ce chapitre est de construire ce cadre à quatre quadrants et de montrer comment l'utiliser avec des données publiées, où toutes les variables sont mesurées. En utilisant les données expérimentales de l'ICARDA (Harris, 1990 ; Ryan et al, 2008), nous avons testé l'hypothèse qu'une nouvelle frontière d'efficience peut être atteinte, en modifiant la structure du système de culture (c'est à dire ici le nombre de culture qui le composent). La description du cadre (concepts, équations et données) et les résultats de son évaluation avec les données expérimentales sont repris plus brièvement dans l'article qui fait l'objet du chapitre 5 et dont l'objectif principal est l'utilisation de ce cadre d'analyse avec les données des agriculteurs en Tunisie.

1. Cadre théorique

Dans un contexte où la pression exercée par l'agriculture sur les ressources naturelles et l'environnement ne cesse d'augmenter, la faible efficience des ressources non renouvelables de la plupart des systèmes de culture constitue un frein préoccupant à un accroissement durable de la production des céréales (Passioura, 2002). Dans la plupart des régions semi-arides du pourtour méditerranéen, la production céréalière doit faire face à de très fortes contraintes naturelles liées à la rareté et l'irrégularité des précipitations combinées à des fortes évapotranspirations (Pala et al, 2007). De ce fait, l'eau est le principal facteur qui limite le potentiel de production céréalière (Garabet et al, 1998). L'apport adéquat des nutriments est aussi un facteur majeur, déterminant la production céréalière, avec l'azote qui est le principal engrais appliqué sur céréales (Latiri-Souki et al, 1998).

L'enjeu dans ces régions est d'augmenter la productivité des terres agricoles et de combler l'écart de rendement résultant de ces facteurs limitants. Ce concept d'écart de rendement (« yield gap ») qui a fait l'objet de nombreux travaux récents (Van Ittersum et al, 2013) a été défini comme étant la différence entre les rendements potentiels et les rendements réels

obtenus chez les agriculteurs (Y_g) (Figure 35.a). Le rendement potentiel (Y_p) est le rendement maximal d'une variété cultivée dans des conditions favorables, sans aucune limitation des facteurs de production. Dans les systèmes pluviaux, où la croissance des cultures est limitée par l'approvisionnement en eau, le rendement maximal permis par l'eau (Y_w), remplace le rendement potentiel pour définir le potentiel de production atteignable dans ces conditions (Van Ittersum et al, 2013). La différence entre les rendements permis par une autre ressource (Y_r) comme l'azote, et les rendements réels obtenus chez les agriculteurs (Figure 35.a) définit ensuite un écart de rendement (Y_g'). Cette différence est également liée à des problèmes de fertilité du sol (autre élément minéral que l'azote, compaction), à des adventices ou à des bioagresseurs (maladies fongiques comme le piétain, insectes comme les pucerons, nématodes...).

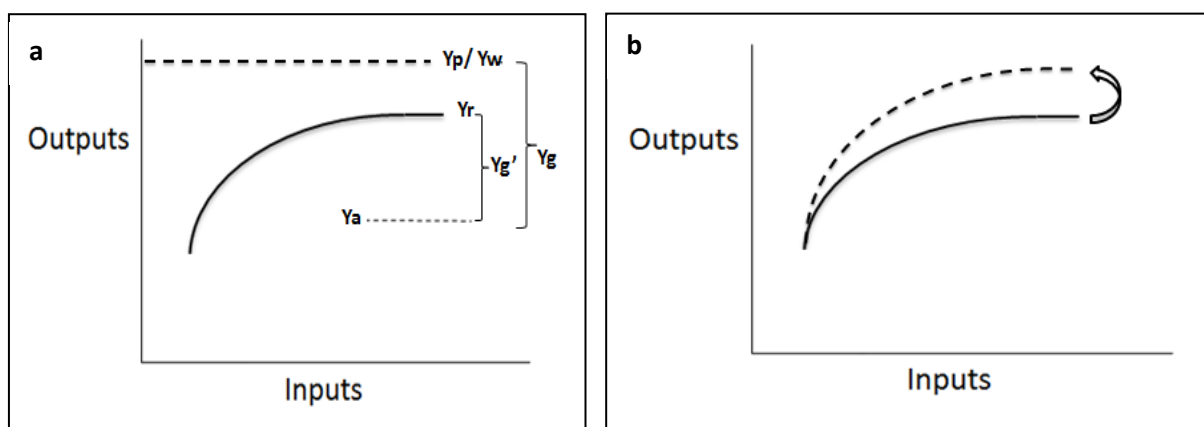


Figure 35. Fonctions de production et frontière d'éco-efficience

Dans des conditions de ressources limitées, il est possible de réduire l'écart de rendement (Y_g ou Y_g') en introduisant des pratiques agricoles permettant l'accroissement de la production et la maximisation de l'efficacité des ressources. Cette combinaison définit la notion d'éco-efficience (Keating et al, 2010) qui a fait l'objet de plusieurs travaux récents, centrés essentiellement sur les régions arides ou de climat de type méditerranéen (Carberry et al, 2014). L'éco efficacité sera augmenté quand un niveau donné de production en grains est réalisé en utilisant moins de ressources, avec moins de pertes pour l'environnement et sans sacrifice sur le potentiel productif de la terre ou de la performance économique. Toute mesure de l'éco-efficience implique de définir des fonctions de production qui mettent en relation l'ensemble des sorties du système visées (production des cultures, services écosystémiques), avec l'ensemble des intrants (ressources, énergie) et des facteurs de production (temps de travail, biodiversité) mobilisés (Keating et al, 2010).

Dans le cadre conceptuel proposé par Keating et al (2010), ces fonctions définissent des frontières d'efficacité propres à chaque système de culture. L'hypothèse associée à cette notion de frontière est qu'il est possible d'atteindre de nouvelles frontières d'efficacité, c'est-à-dire d'augmenter simultanément la productivité et l'efficacité des intrants, en modifiant la composition et la structure des systèmes de culture (Figure 35.b).

2. Elaboration d'un cadre d'analyse applicable dans les conditions d'un réseau de parcelles d'agriculteurs

Le cadre d'analyse a été construit en combinant les concepts de facteur limitant, d'écart de rendement et de la frontière d'éco-efficacité. En adoptant l'approche de De Wit (1992), l'efficacité de l'utilisation de l'azote représentée par la relation entre les quantités d'azote apportées et les performances (Figure 35) a été décomposée dans un diagramme à quatre quadrants (Figure 38.d, Chapitre 5). Dans une première étape, nous avons introduit l'azote absorbé par la plante dans la partie droite, entre l'azote apporté et les rendements en grains, pour séparer l'efficacité de la captation de la ressource (N) et l'efficacité de sa conversion en grain. Cette partie droite est appelée « Analyse » de l'agrosystème car elle permet de caractériser les processus de captation de la ressource du sol et de sa conversion en grains. L'absorption de l'azote peut démarrer avant de fertiliser, en utilisant les ressources azotées du sol issues des reliquats d'azote minéral, des résidus organiques ou des exsudats racinaires des légumineuses. Une fois l'azote absorbé, l'efficacité de conversion de la ressource, n'est plus dépendante du sol, mais elle est, essentiellement dépendante des caractéristiques génétiques de la plante et des conditions climatiques tels que les températures extrêmes qui peuvent être à l'origine des problèmes d'échaudage (mauvais remplissage du grain) induisant des pertes de rendement en fin de cycle. Dans la partie gauche, l'efficacité de l'utilisation de l'azote a été introduite entre l'intrant (N apporté) et le rendement afin d'analyser les compromis entre l'efficacité et la production ou l'intrant. Cette partie à gauche du diagramme est appelée « Conception » car elle permet d'analyser des scénarios (à l'échelle de l'exploitation ou de la région) d'étude des marges de manœuvre dans les compromis entre la production alimentaire et l'utilisation d'intrants.

3. Etablissement des courbes enveloppes dans chaque quadrant du cadre d'analyse

Afin d'analyser l'effet du précédent cultural sur l'efficacité de la captation et de la conversion de la ressource et sur les compromis entre l'efficacité de l'intrant et la production/l'intrant, des courbes enveloppes ont été établies, en fonction des rotations, au niveau de chaque quadrant (Figure 38.d, Chapitre 5). Dans la partie droite, ces courbes sont des frontières

d'efficience qui représentent une performance atteignable (N absorbé, rendement) à un niveau donné d'intrant (N apporté, N absorbé). Les frontières d'efficience de la captation de la ressource (quadrant I) ont été établies en utilisant le modèle suivant (Fermont et al, 2009) (2.1, Chapitre 5) :

$$(Eq. 1) \quad Na = \frac{N_{max}}{1 + (k \exp^{-rx})}$$

Na est l'absorption maximale atteignable à chaque niveau d'apport azoté (x), Nmax, le niveau maximal observé de la variable cible (N absorbé), k et r sont des constantes qui influencent l'intersection de la courbe avec l'axe des x et la pente respectivement. Ces paramètres peuvent être analysés plus en détail en référence aux processus biophysiques: k représente la quantité d'N fournie par d'autres sources telles que la minéralisation de la matière organique du sol pendant le cycle de culture, tandis que r représente la capacité de la plante à capturer l'azote (Delogu et al, 1998).

Les courbes enveloppes ont été établies à partir des points limites qui représentent les rendements maximaux pour chaque niveau d'apport azoté. Pour sélectionner ces points, nous avons choisi une fenêtre de taille fixe ($h = (\max(x) - \min(x))/10$), sur l'axe des abscisses, et nous avons cherché sur chaque fenêtre le rendement maximal observé (Ymax) pour chaque valeur de la variable indépendante (X=N apporté). Ceci a permis d'obtenir une série de 10 points de coordonnées (X, Ymax).

Pour la conversion de la ressource (quadrant II), les frontières d'efficience doivent passer par l'origine car la croissance de la plante n'est pas possible en l'absence d'azote absorbé. Par conséquent, ces courbes peuvent être établies en utilisant l'équation d'un polynôme de second degré de type (Eq.2, ax^2+bx), en considérant que cette courbe décroît à partir d'un certain niveau d'azote absorbé au-delà duquel la teneur en azote des grains commence à augmenter (2.1, Chapitre 5).

Dans la partie gauche, les courbes représentant le compromis entre l'efficience de l'utilisation de l'azote et les rendements en grains (quadrant III) et l'efficience de l'utilisation de l'azote et les apports azotés. Elles ont été établies à partir des équations utilisées dans les deux quadrants (I et II) de la partie droite. Dans le quadrant III, les rendements maximum atteignables pour chaque niveau d'apport azoté, ont été estimés en utilisant les équations des frontières d'efficience de la captation (N absorbé = f (N apporté)) et de la conversion de la ressource (Rendement = f (N absorbé)). Les efficacités maximales atteignables ont été calculées comme étant le ratio entre les rendements maximum atteignables pour chaque niveau d'apport azoté et la quantité d'N apporté.

Ce cadre d'analyse à quatre quadrants a été testé en utilisant des données publiées sur des expérimentations réalisées à la station de l'ICARDA à Tel Hadya au nord de la Syrie (2.3, Chapitre 3). Dans ces essais expérimentaux, la matière sèche en grains et en pailles et les teneurs en azote des grains et des pailles ont été mesurées sur des parcelles de blé dur conduites en pluvial, soumises à quatre traitements azotés (0, 30, 60, 90 kg/ha) et cultivées dans sept types de rotation biannuelle. Les différents précédents culturels du blé dur étaient : Jachère, Pastèque, Blé, Pois chiche et autres légumineuses (Lentille, Vesce et Luzerne).

4. Estimation des paramètres des frontières d'efficience

Afin de tester l'hypothèse de l'éco-efficience (Keating et al, 2010) qui est la possibilité d'atteindre de nouvelles frontières d'efficience, en changeant la rotation, différentes courbes enveloppes de la capture de la ressource ont été établies en fonction des précédents culturels. Pour déterminer les paramètres de ces frontières d'efficience, nous avons sélectionné une série de points qui représentent la zone frontière à partir des données observées, c'est-à-dire les points pour lesquelles l'absorption de l'azote est maximale à chaque niveau d'apport azoté (Shatar et Mc Bratney, 2004). Ensuite, nous avons ajusté un modèle non linéaire (Eq.1) sur ce sous-ensemble de points, et N_{max} , k et r ont été estimés par la méthode des moindres carrés généralisés (www.R-project.cran.com). La comparaison statistique des frontières d'efficience a été effectuée en comparant l'effet de ces modèles de régression non linéaire avec ou sans rotation sur les paramètres N_{max} , k et r . Pour choisir le meilleur modèle entre un modèle global (toutes les rotations ont été ajustées sur la même courbe enveloppe avec la procédure `nls`) et un modèle spécifique (un effet de rotation a été introduit sur chaque paramètre de la courbe enveloppe), nous avons utilisé le critère d'information d'Akaike (AIC). Ce critère permet de comparer des modèles emboîtés (le cas de nos modèles de régression) ainsi que les résultats ne dépendent pas de l'ordre des facteurs dans le modèle. L'utilisation du critère d'information d'Akaike (AIC) pour la comparaison des modèles permet d'intégrer dans les tests statistiques l'écart entre les valeurs des paramètres estimés, mais aussi l'incertitude sur chacune de ces estimations. L'ajustement a été effectué avec des fonctions `nls` et `gnls` (dans le package `nlme`) qui ont été utilisées pour la régression non linéaire sous R.

Nous avons également déterminé les paramètres de la frontière d'efficience de la conversion de la ressource (quadrant II) en ajustant un modèle de régression non linéaire (Eq.2) sur des points qui représentent la zone frontière. L'ensemble de ces points a été sélectionnés suivant la même procédure que celle adoptée pour établir les courbes de la captation de la ressource.

Comme précédemment, ces frontières d'efficacité établies par type de rotation ont été comparées selon le critère d'information d'Akaike (AIC).

Ce cadre d'analyse testé avec des données expérimentales de l'ICARDA où l'azote absorbé a été mesuré, a été appliqué dans une étape suivante sur des données collectées auprès des agriculteurs (Chapitre 5). En revanche, n'ayant pas de mesure de la quantité d'azote absorbé sur chaque parcelle de blé dur, nous avons établi un modèle permettant de l'estimer (2.3, Chapitre 5). Basé sur une seule variable qui est la biomasse en grains, ce modèle a conduit à forcer les frontières d'efficacité du quadrant II à avoir une forme linéaire. Pour cette raison, nous avons testé sur les données expérimentales de l'ICARDA, l'erreur induite par le modèle linéaire par rapport au modèle non linéaire (Eq.2) selon le critère d'information d'Akaike (AIC).

5. Test du cadre d'analyse sur des parcelles expérimentales en Syrie (ICARDA)

5.1. Analyse de l'efficacité de la captation et de la conversion de l'azote

Les frontières d'efficacité mettant en relation l'N apporté et l'N absorbé sont significativement différentes en fonction du précédent cultural (Figure 36.a). La courbe la plus élevée a été obtenue avec un précédent légumineuse (hors pois chiche) suivi par le blé cultivé après une jachère. Cependant, la courbe la plus basse a été observée pour le blé dur en monoculture. En effet, la valeur du critère d'information d'Akaike (AIC) du modèle spécifique (gnls) est plus faible que celle du modèle global (nls) (Tableau 9). L'intersection des frontières d'efficacité avec l'axe des x, qui représente la quantité d'N fournie par le sol, est plus importante pour un blé dur cultivé en rotation qu'en monoculture. La quantité la plus élevée d'N absorbé avec zéro N apporté a été obtenue avec un blé cultivé après une légumineuse. L'absorption maximale d'N (N_{max}) la plus élevée a été également observée pour le blé dur en rotation avec des légumineuses (179 kg / ha), suivie par le blé après une jachère, une culture de pastèque et une culture de pois chiche (Figure 36.a). Cependant, l'absorption maximale d'N la plus faible a été trouvée avec le blé en monoculture (49 kg/ha). L'efficacité de captation de la ressource azotée exprimé par le rapport entre la quantité d'N absorbé et la quantité d'N apporté, la plus élevée a été obtenue avec le blé venant après des légumineuses (2,45 et 1,56 kg d'N absorbé/kg avec N apporté égal à 50 et 100 N/ ha respectivement), alors que l'efficacité la plus faible a été observée pour le blé en monoculture (0,79 et 0,46 kg / kg). En position intermédiaire, on retrouve le blé dur après une jachère, une culture de pastèque et une culture de pois chiche respectivement.

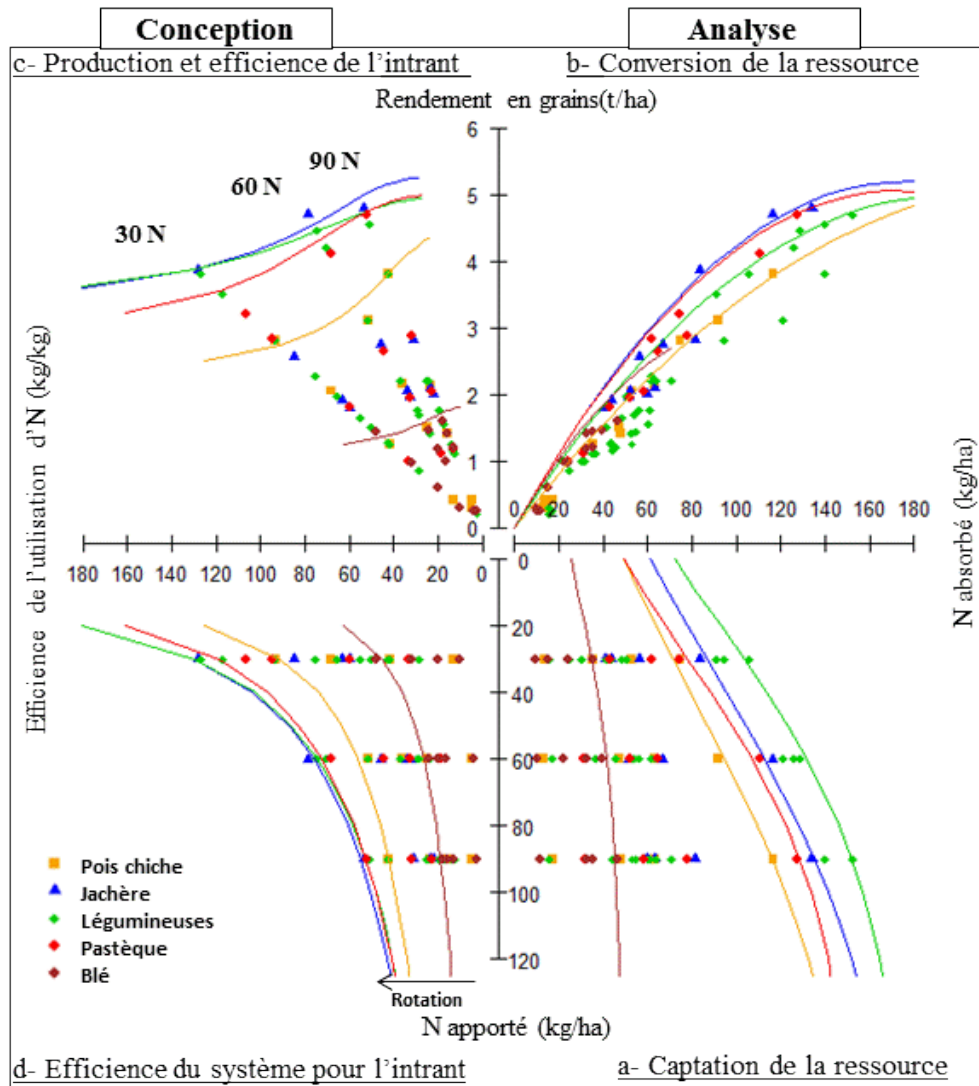


Figure 36. Cadre d'analyse à quatre quadrants établi avec les données des expérimentations réalisées à la station de l'ICARDA au nord de la Syrie, permettant de comparer des mesures réels à des courbes enveloppes mettant en relation la captation de la ressource (a), la conversion de la ressource (b) et les compromis entre l'efficacité de l'intrant et les rendements (c)/les intrants (d)

Tableau 9. Paramètres de la frontière d'efficacité de la captation d'N et critère d'information d'Akaike (AIC) permettant de comparer le modèle simple (nls) et le modèle spécifique (gnls) pour tester la courbe de chaque rotation à la courbe la plus élevée. Le p-value détermine la différence significative entre la courbe de chaque rotation et la courbe supérieure

Précédent cultural	Jachère	Pastèque	Légumineuses	Pois chiche	Blé
Nmax	179,79	153,57	178,99	161,17	48,85
k	1,9301	2,1339	1,484	2,251	0,9226
r	0,0196	0,0265	0,0236	0,0195	0,0275
AIC (gnls)	159,85	166,52	417,01	155,97	134,00
AIC (nls)	234,90	259,55	411,01	277,33	335,91
p-value	<0,0001	<0,0001	1,00	<0,0001	<0,0001

Les frontières d'efficacité de la conversion de l'azote sont également significativement différentes en fonction du précédent cultural (figure 36.b), selon le critère d'information d'Akaike (AIC) (Tableau 10). Cependant, cette différence n'est pas aussi importante que la différence entre les frontières d'efficacité de la capture d'N. La courbe la plus élevée a été obtenue avec la rotation jachère-blé qui n'était pas significativement différente de la courbe obtenue avec la rotation pastèque-blé. Le rendement maximal a été significativement plus élevé avec les rotations jachère-blé (5,2 t/ha), pastèque-blé (4,9 t/ha) et légumineuses-blé (4,8 t/ha) qu'avec le blé en monoculture (1,8 t/ha).

En présence de faible quantité d'N absorbé (inférieurs à 50 kg/ha), l'efficacité de conversion de l'N (le rapport entre le rendement et la quantité d'N absorbé) la plus élevée a été observée avec les rotations jachère-blé et pastèque-blé (50,8 et 50,3 kg de grains/kg d'N absorbé avec N apporté égal à 50 N/ha). Dans le cas où l'N absorbé est supérieur à 50 kg/ha, la frontière d'efficacité du blé en monoculture n'a plus de sens. L'efficacité de la conversion d'N est également plus importante avec les rotations jachère-blé et pastèque-blé. Cependant, l'efficacité la plus faible a été observée chez le blé cultivé après le pois chiche. La comparaison du modèle non linéaire (Eq. 2), utilisé pour établir les frontières d'efficacité de la conversion d'N (Figure 36.b), avec un modèle linéaire a révélé que le modèle non linéaire permet un meilleur ajustement des données (AIC plus faible), mais la différence entre ces

deux modèles n'était pas significative pour toutes les rotations (Tableau 11). Par conséquent, l'erreur induite par la méthode d'estimation de l'N absorbé dans les parcelles des agriculteurs en Tunisie (2.3, Chapitre 5) ne change pas le classement des rotations.

Tableau 10. Paramètres de la frontière d'efficacité de la conversion d'N et critère d'information d'Akaike (AIC) permettant de comparer le modèle simple (nls) et le modèle spécifique (gnls) pour tester la courbe de chaque rotation à la courbe la plus élevée. Le p-value détermine la différence significative entre la courbe de chaque rotation et la courbe supérieure

Précédent cultural	Jachère	Pastèque	Légumineuses	Pois chiche	Blé
a	-1,67E-04	-1,71E-04	-1,15E-04	-8,70E-05	-1,51E-04
b	0,059	0,059	0,049	0,042	0,044
AIC (gnls)	-27,30	-16,22	-66,14	-16,53	-58,96
AIC (nls)	-28,96	-10,90	-2,13	19,44	6,03
p-value	0,3109	0,0095	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Tableau 11. Comparaison de deux modèles permettant d'établir les courbes enveloppes de la conversion de la ressource en se basant sur le critère d'information d'Akaike (AIC) et la somme résiduelle des carrés (RSS)

	Précédent cultural	Jachère	Pastèque	Légumineuses	Pois chiche	Blé
Model 1:	RSS	1,391	0,428	1,855	0,457	0,190
ax	AIC	11,838	-5,100	-4,113	-4,172	-21,552
Model 2:	RSS	0,365	0,393	1,499	0,391	0,152
ax² + bx	AIC	-3,570	-4,291	-10,408	-4,381	-23,075

5.2. Compromis entre les rendements en grains et l'efficacité de l'utilisation de l'N

La partie gauche du cadre d'analyse à quatre quadrants permet de passer de l'analyse fonctionnelle (partie droite) à la réflexion stratégique permettant d'appuyer la conception des systèmes de culture. Cette partie permet d'évaluer les compromis entre l'efficacité de l'utilisation de N et la production (rendements en grains, figure 36.c) ou d'intrant (quantité

d'engrais azoté apporté, figure 36.d). Les courbes enveloppes des compromis entre l'efficacité de l'utilisation de l'N et la production étaient différentes en fonction des précédents culturaux. Dans le cas du blé en monoculture, l'efficacité la plus élevée (63 kg/kg) observée sur la courbe a été associée à un faible rendement en grains (1,25 t / ha) obtenu avec une faible dose de fertilisation azotée. En changeant le précédent cultural pour passer à un système de rotation diversifiée, on obtient de nouvelles frontières d'efficacité permettant une augmentation simultanée des rendements et de l'efficacité de l'utilisation de l'N. En effet, pour chaque niveau d'apport azoté, le compromis entre les rendements et l'efficacité est meilleur avec les rotations, principalement jachère-blé et légumineuses-blé, qu'avec un blé en monoculture (Tableau 12). Les points mesurés qui représentent la relation entre l'efficacité de l'utilisation de l'N la quantité d'apport azoté ont fait apparaître trois droites dont chacune correspond à un niveau de fertilisation azotée (30, 60 et 90 kg/ha). Tout au long de chaque droite, l'efficacité de l'utilisation de l'N augmente avec l'augmentation des rendements en changeant le précédent cultural.

Tableau 12. Valeurs maximales observées pour le rendement (Y_{max}) et l'efficacité d'utilisation d'N (E_{max}) pour chaque traitement (traitements azotés et rotation)

Précédent cultural	N (kg/ha)	Y _{max} (t/ha)	E _{max} (kg/kg)
Jachère	30	3,88	129,48
	60	4,56	75,96
	90	4,96	55,10
Pastèque	30	3,56	118,57
	60	4,34	72,33
	90	4,74	52,62
Légumineuses	30	3,88	129,18
	60	4,45	74,22
	90	4,74	52,71
Pois chiche	30	2,74	91,19
	60	3,36	56,07
	90	3,82	42,43
Blé	30	1,36	45,20
	60	1,58	26,39
	90	1,71	18,98

5.3. Analyse de scénarios pour une réflexion stratégique sur les systèmes de culture

Les courbes enveloppes établies dans la partie gauche appelée « Conception » représentent les compromis atteignables, au niveau des parcelles conduites en pluvial, entre le niveau d'intrant et son efficacité pour la production alimentaire (ici le blé dur) (Figure 37.d) et entre un objectif de production alimentaire (ici le rendement en grains) et un objectif d'efficacité des intrants (figure 37.c).

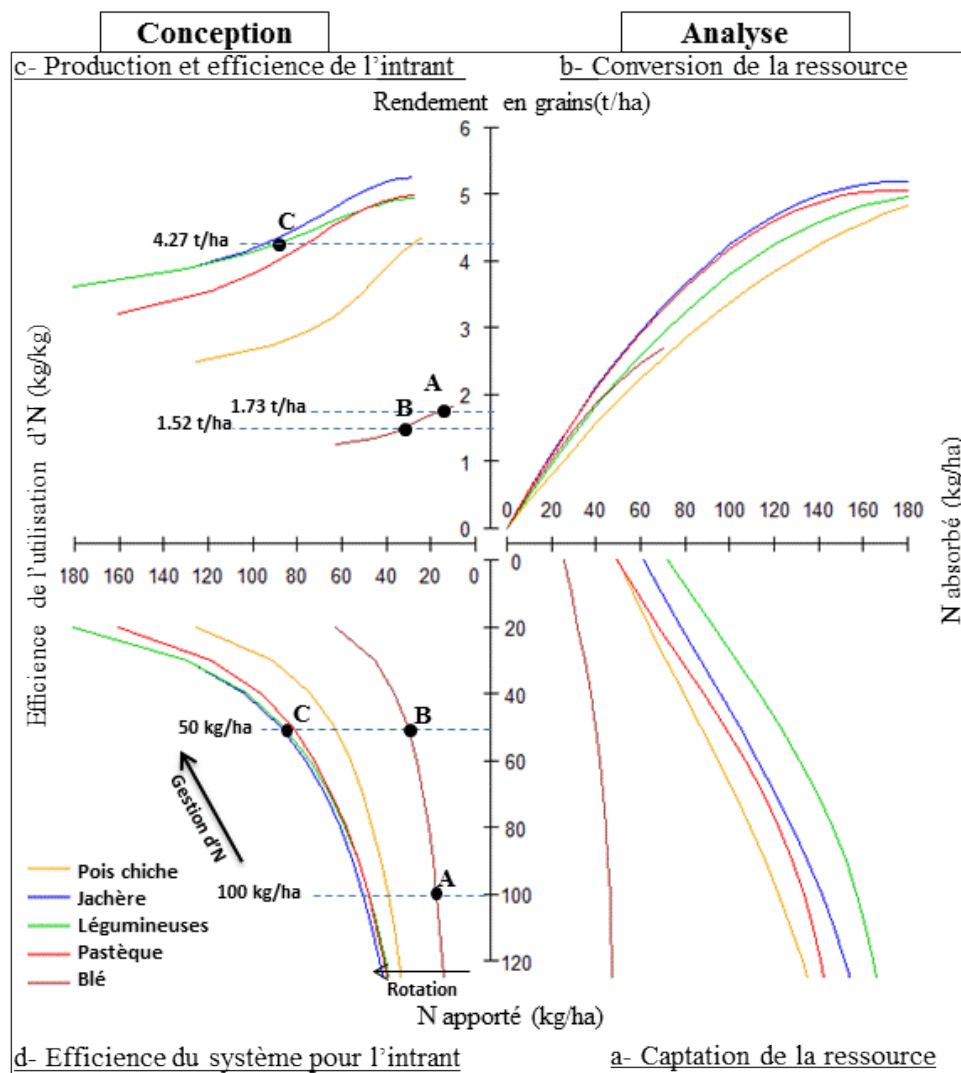


Figure 37. Cadre d'analyse à quatre quadrants permettant d'analyser des études de cas (points A, B et C) et proposer des voies d'amélioration des compromis entre l'efficacité de l'intrant et les rendements (c)/les intrants (d), en se basant sur les courbes enveloppes

L'introduction de la variable superficie permet une analyse stratégique des scénarios dans le nexus superficie-intrants-aliments (Ringler et al, 2013) à partir de l'identité (Eq.3) c'est à dire la décomposition d'une performance (ici la production alimentaire) en composants de base qui reste valable à différentes échelles (Porter et Christensen, 2013).

$$(Eq. 3) \text{ Production alimentaire} \equiv \text{Superficie} \times \frac{\text{Intrant}}{\text{Superficie}} \times \frac{\text{Production alimentaire}}{\text{Intrant}}$$

Le premier terme représente « l'empreinte terre » du système de culture, le second son intensivité en intrants et le troisième son efficacité pour l'intrant considéré.

Pour illustrer l'utilisation de cette entité à partir des courbes de compromis de la partie gauche du cadre on peut prendre l'exemple d'une exploitation de cinquante hectares, qui produirait, en monoculture, 86 T (tonnes) par an de blé dur (point A, rendement = 1,73 t / ha, N = 100 kg/ha) en utilisant 5 T d'azote (Annexe 6). En se déplaçant tout au long de cette courbe qui correspond au blé dur en monoculture, l'efficacité de l'utilisation de l'azote peut être améliorée en réduisant de 50% la quantité d'azote apporté (de A à B, Figure 37.d). Toutefois, le rendement va diminuer à 1,52 t/ha (figure 37.c) qui correspond à une production totale de 76 T an. En passant d'un système de monoculture à un système de rotation avec des légumineuses (point C, Figure 37.c), il est possible d'augmenter le potentiel de rendement pour arriver à 4,27 t/ha tout en réduisant de moitié la quantité de fertilisants utilisés (50 kg d'N/ha). Cette augmentation de la production de grains est suffisamment élevée pour compenser la réduction d'un tiers des superficies du blé dur dans une rotation triennale (légumineuses, blé, blé) (96,5 T/an de blé dur avec 2,5 T d'azote). Si l'on ajoute le fait que les légumineuses peuvent produire des aliments sans fertilisation azotée, en utilisant les rendements de lentille et de pois chiche obtenus dans la même expérimentation (Beck et al, 1992), la quantité totale d'engrais azoté utilisé dans les trois ans de rotation sera réduite d'un tiers. La rotation avec des légumineuses va ainsi augmenter la production en protéine (21 T/an) et l'efficacité de l'utilisation de l'N, tout en produisant des aliments de plus en plus diversifiés (Tableau 13).

Tableau 13. Valeurs moyennes annuelles des apports azotés par hectare (N), de la production alimentaire totale et de l'efficacité de l'utilisation d'N (E) obtenus dans une exploitation de cinquante hectares en rotation triennale, avec différents scénarios de système de culture

Rotation	Production de Protéine (t/an)	Superficies (ha)	N apporté (kg/ha/an)	Efficacité (t de Protéine/t d'N)
Blé en monoculture	6,7	50	0	-
	10		50	4
	11,4		100	2,3
Jachère-blé-blé	8,8	50	0	-
	12,9		33	7,8
	14,8		66	4,5
Pois chiche-blé- blé	15	50	0	-
	18,6		33	11,3
	20,7		66	6,3
Lentille-blé-blé	16,9	50	0	-
	21		33	12,7
	27,1		66	8,2

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons proposé un cadre d'analyse combinant l'analyse des processus et l'analyse des compromis entre la production alimentaire et l'utilisation d'une ressource non renouvelable (ici l'azote apporté avec l'engrais) dans les systèmes de culture. En utilisant des données expérimentales, ce diagramme à quatre quadrants nous a permis de valider l'hypothèse de la possibilité d'atteindre un nouveau compromis entre la production de blé dur et l'efficacité de l'azote en changeant le précédent cultural. Cette démarche est ensuite appliquée sur un réseau de parcelles d'agriculteurs en Tunisie (Chapitre 5) puis nous ferons une première tentative pour l'appliquer à une autre ressource limitante (l'eau).

Chapter 5: Trade-offs analysis between Productivity and Input efficiency: a case study on Nitrogen fertilization on Durum wheat in Mediterranean conditions

Ce chapitre a fait l'objet d'un article scientifique qui a été soumis en Mars 2017 dans la revue *European Journal of Agronomy*, où il a été refusé. Le papier a été repris et soumis en Juin 2017 dans la revue *Field Crop research* où il a été aussi refusé. Cet article sera repris pour une troisième soumission dans la revue *Archives of Agronomy*, qui aura lieu en Octobre 2017.

Yosser Ben Zekri, Karim Barkaoui, Hélène Marrou, Insaf Mekki, Hatem Belhouichette, Jacques Wery (2017) “**Trade-offs analysis between Productivity and Input efficiency: a case study on Nitrogen fertilization on Durum wheat in Mediterranean conditions**”.

Objectifs du chapitre

Dans ce chapitre, nous proposons d'appliquer le cadre d'analyse des compromis entre la production et l'efficacité de l'azote sur les données d'agriculteurs en Tunisie. Dans ce cadre, nous comparons l'efficacité de la captation et de la conversion de la ressource, les relations entre l'efficacité de l'utilisation de l'azote et le rendement/les intrants et les écarts d'absorption d'azote. Les premiers résultats élaborés dans ce chapitre sur le test du cadre avec les données expérimentales de l'ICARDA ont été décrit en Français dans le chapitre précédent (chapitre 4).

Abstract

One of the challenges of eco-efficient agriculture is the development of operational farming practices to increase the level of agricultural production, maximize the efficiency of resource use and reduce environmental impacts. Based on the efficiency frontier concept and the decomposition of resource use efficiency, we propose a four-quadrant framework allowing to carry a functional analysis of cropping system using only easy to access information collected through farmer survey or simple field measurements. This framework divides the elaboration of yield and final nitrogen (N) use efficiency into sub processes with specific efficiencies. In quadrants of the framework we established boundary curves which represent the maximum achievable performances (yield, N uptake, N-use efficiency) when N is the only limiting factor. This framework has been tested on published data from 112 agronomic situations of

rainfed durum wheat in experimental fields in northern Syria and on a data set of 243 agronomic situations of durum wheat in farmers' fields in two grain-producing regions of Tunisia. The approach demonstrated that non-cereal preceding crops (legumes or vegetable) resulted in a higher potential for N uptake by durum wheat but had only a minor effect on the conversion of this N into grains. The trade-off curves between N-use efficiency and grain yield or N fertilizer use, showed that legumes and vegetables can increase both yield and N-use efficiency of the following durum wheat. This positive effect of diversified rotation on potential N uptake by durum wheat is partly of-set by increased N uptake gaps in farmer's fields indicating a higher effect of other limiting factors.

Keywords

Eco-efficiency, Decomposing efficiency, N capture, Crop successions, Design, Cropping systems, N uptake gap

1. Introduction

South Mediterranean countries have to meet the challenge of increasing food production, especially yield of strategic crops such as cereals, and simultaneously cope with unfavorable crop growth conditions due to water scarcity and uneven access to fertilizer (Pala et al, 2007). Although water availability is by far the main limiting factor of cereal grain production in the South Mediterranean (Garabet et al, 1998), nitrogen (N) availability is also a key factor (Boussen et al, 2005). Cereals need large amounts of N to produce both straw, frequently used for animal feeding, and grain yield with high levels of proteins especially for durum wheat (Latiri et al, 1998). Therefore most farmers use significant amount of N fertilizers on cereals in the region. However, N losses through volatilization and leaching are frequent in the region, especially during rainy years, impacting both soil N availability for crops and surface and ground water quality (Karrou et al, 2001). In addition, the increase in cost of N fertilizers has significantly degraded the profit margins of most cereal producers (Anbessa and Juskiw, 2012). Therefore, reducing the amounts of N fertilizer used in cereal-based cropping systems can be considered as a major driver of sustainability.

Reducing N input, while increasing cereal grain yields, requires a significant increase in N-use efficiency (Porter and Christensen, 2013). The simultaneous increase in both yield and N-use efficiency is at the core of the “eco-efficient” agriculture which targets efficient and sustainable use of resources in agricultural production and land management (Keating et al, 2010). In his pioneering work on resource use efficiency in crops, De Wit (1992) proposed to

decompose the efficiency frontier into processes underlying resource capture and conversion. To do so, the amount of N uptake was considered as intermediate variable between N input and crop yield in order to analyze the functional determinants of biomass production. More recently, the eco-efficiency concept has been introduced by Keating et al. (2010). It relies on the hypothesis that the maximum resource efficiency of each cropping system, i.e. the potential amount of any agricultural output (e.g. crop yield) achieved at a given level of resource input (e.g. amount of N fertilizer) can be characterized by a non-linear function of resource input called eco-efficiency frontier. The eco-efficiency frontier cannot be transgressed without adopting transformational technologies, such as changing crop genotype (Keating et al, 2010) or by enhancing crop diversity within cropping systems (Gaba et al, 2015). Eco-efficiency frontiers were further used to compare resource efficiency across farmers' fields (Carberry et al, 2013) and were shown relevant to analyze regional yield gaps (Van Ittersum et al, 2013). Yield gaps represent differences between actual farmers' yields and the maximum yield that can be attained if only one resource is limiting (e.g. N-limited potential yield) (Keating et al, 2010; Van Ittersum and Rabbinge, 1997).

With regards to N resource, yield gap closure could be achieved through farming practices that simultaneously increase crop productivity and maximize N-use efficiency. According to Rahman et al, (2014), the use of alternative sources of N such as biological fixation by legumes and/or residual soil N pools as well as improved fertilization practices are relevant strategies to improve both the autonomy of farming systems regarding N fertilizers and the N-use efficiency. Crop rotations have been increasingly recognized to benefit to crop growth and development of subsequent cereals even in water-limited environments as they improve soil moisture as well as soil N availability through legume N-fixing processes (Ryan et al, 2008), and therefore enhance N capture and conversion (De Wit, 1992). They would also break diseases and weeds cycles (Ryan et al, 2008).

Combining the eco-efficiency approach with the De Wit (1992) decomposition framework can provide a cross cutting analytical tool to determine how simple experimental and farmers' fields measurements may be used for a more comprehensive diagnosis and to identify which mechanisms need to be amplified to improve the productivity and efficiency of cropping systems. On this basis, we propose a methodology to decompose and analyze N-use efficiency and its trade-off with productivity (i.e. yield) applied to the case of durum wheat in the Mediterranean basin. Using data from rainfed wheat-based cropping systems in two regions: Syria and the North of Tunisia, we tested the hypothesis that agronomic synergies between N-

use efficiency and wheat yield may be achieved with diversified crop rotation, in particular in the case of legume-rich crop sequences. In addition, we tested whether the impact of crop rotations on eco-efficiency frontiers was associated with an effect on the gap between this frontier and the actual value in farmer's fields, indicating an effect of crop rotation on other limiting factors than N.

2. Material and Methods

2.1. The four quadrants diagram: a framework to work in farmer's fields

We propose a four-quadrant framework with the aim to summarize the relationships between the three key concepts in agronomy: (i) the limiting factor (Fig. 38a), (ii) the yield gap (Fig. 38b) and (iii) the eco-efficiency frontier (Fig. 37c, d). Such a synthetic framework which can be implemented with simple field measurements or farmer surveys allows analyzing the distance to efficiency frontiers resulting either from local soil factors (e.g. amount of residual N) or from reduced plant processes efficiency.

Here, the amount of N uptake (in the right part of the framework) is introduced as an intermediate variable to decompose the overall N-use efficiency (ratio between yield and N-input), into N capture efficiency (quadrant I) and N conversion efficiency (quadrant II). N capture efficiency is given by the ratio between the amount of N uptake and total amount of N-input, while N conversion efficiency is given by the ratio between final biomass (or grain yield, or grain protein yield) and the amount of N uptake.

In each of the four quadrants, a curve delimitating the upper limit of all observed situations can be fitted. On the right part of the framework (I, and II, Fig. 38d), the resulting curves represent eco-efficiency frontiers which define the maximum achievable performance (N uptake, yield) for a given level of resource (N-input, N uptake). On the left part of the framework (III, and IV, Fig. 38d), the curves represent trade-off relationships between performances (e.g. yield) or intensivity (the amount of N applied per ha) and efficiency of the input. Therefore, the quadrants I and II provide analytical evidence for determining which process is most limiting in order to bridge efficiency and yield gaps. In a complementary manner, the trade-off boundary curves in quadrant III allow to explore how different cropping strategies (here diversification of crop rotation) can influence the trade-offs between productivity and resource efficiency. Quadrant IV provides a trade-off curve between the intensity of resource use (e.g. amount of N applied per ha) in farmers' fields conditions and N-use efficiency (e.g. amount of food produced per Kg of N).

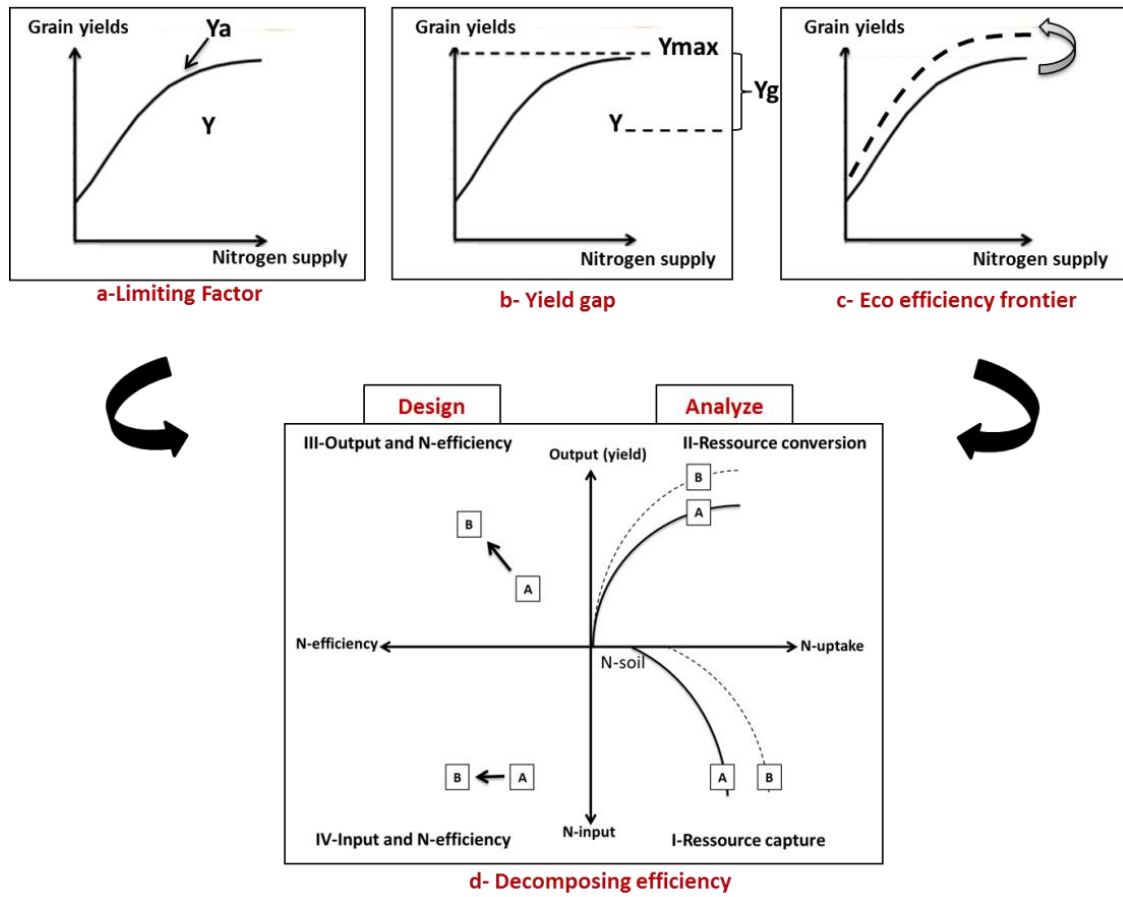


Figure 38. Conceptual framework based on concepts of limiting factors (a), yield gap (b), eco-efficiency frontier (c) and decomposition of resource efficiency (d) allowing to analyze the efficiency of resource capture and conversion and to design cropping systems based on trade-offs between efficiency and performances or inputs. Ya and Ymax are the achievable and the potential (maximum) performance respectively when the resource in the x axis (N supply) is not limiting for plant growth. A and B are the same crop in different crop rotations.

The shape of any output-input response curves (quadrant I) can be intuitively designed as concave downward, indicating that for each additional increment of input, the marginal increase in performance is smaller than from the previous input increment (Singleton et al, 1992; Von Liebig, 1855; Mitscherlich, 1909). Consequently, the eco-efficiency frontier of N capture could be modeled as follows (Fermont et al, 2009) (Eq. 1):

$$(Eq. 1) \quad N_a = \frac{N_{max}}{1 + (k \exp^{-rx})}$$

Where N_a is the maximum attainable N uptake by crops for a given level of N-input (x), N_{max} is the curve asymptote which reflects the maximum N uptake by crops, and k and r are constants that influence the intercept and slope, respectively. These parameters can be related to biophysical processes: k represents the amount of N supplied by other sources of N than fertilizers such as mineralization of soil organic matter during the crop cycle, while r stands for the ability of the plant to capture the fertilizer (Delogu et al, 1998). Indeed N uptake by crops could start before fertilization, reflecting the use of soil N made available by mineralization of soil organic matter or by residual N pools of the previous crop (Fustec et al, 2010). Therefore, the fitted curve has a positive intercept. In addition, we assume that small amounts of nitrogen supplied in excess have no significant effect on N uptake (Cox and Reisenauer, 1973; Wang et al, 2011) explaining why this curve do not decrease with increasing amounts of nitrogen fertilizer. Once N has been captured by crops, N conversion (quadrant II) is no longer dependent on soil fertility factors, but depends mainly on plant factors (e.g. plant genetics, functional traits, phenology) and other external factors such as climate (e.g. water scarcity, extreme heat), diseases etc. According to Spiertz and De Vos (1983), the relationship between N uptake and yield (quadrant II) may be approximately linear at low values of N uptake, but above a certain level the curve should deviate downwards, reflecting an increase in tissue N content. A second-order polynomial model ($Y_a = ax^2 + bx$, Eq.2) equation is expected to fit well such curve shape, where Y_a is the maximum attainable yield for a given level of N uptake (x). The curve has the origin as intercept since crop growth is not possible with zero N-uptake (De Wit, 1992).

Finally, the shape of trade-off curves between N-use efficiency and biomass production (III) and N fertilizer (IV) can be calculated from the equations of the boundary curves obtained in quadrants I and II (Fig. 38d). In quadrant III, maximum attainable yields for each level of N-input are estimated by chaining equations of boundary curves of nitrogen capture ($N\text{-uptake} = f(N\text{-input})$) and conversion ($Y = f(N\text{-uptake})$). Conversely, maximum attainable N-use efficiency was calculated as the ratio between maximum attainable yields for each level of N-input.

2.2.Data sets

In a first step, the four quadrant framework was implemented to test the a priori shapes of boundary curves (eco-efficiency frontiers to the right and trade-off frontiers to the left), using extensive and detailed experimental data. Data originated from a rotation trial with rainfed

durum wheat established in 1983–1984 in ICARDA's research station at Tel-Hadya, in northern Syria (Harris, 1990; Ryan et al, 2007). In this region, annual rainfall varies from 200 to 600 mm, with high inter-annual and within-season variability (Cooper et al, 1987). The soil had a clay texture with organic matter content varying from 0.8 to 1 %. Data on grain yields and total dry matter of durum wheat, were collected from wheat plots grown with four N fertilization rates (0, 30, 60 and 90 Kg N/ha), in seven two-year rotations from 1985/1986 to 1988/1989. The various preceding crops of wheat were: Fallow, Watermelon, Wheat, Chickpea and other legumes (Lentil, Vetch and Medic). N concentration in grain and straw, as influenced by N-rate and crop rotations were measured between 1989–1990 and 1997–1998.

After checking the framework consistency regarding boundary curve shape with experimental data of ICARDA's research station, we used it to analyze a database obtained with a survey of farmers' fields in Tunisia. The purpose of the study was to address whether better compromises between N-use efficiency and wheat yield may be achieved with crop rotation, in particular in the case of legume rich rotation. Data on rainfed durum wheat were collected in two Tunisian regions: Fernena, and Lebna catchment. Fernena belongs to the governorate of Jendouba that is located in the North-West of Tunisia in a sub humid bioclimatic area characterized by a mean annual rainfall of 450 mm (Rezgui et al, 2005). In the watershed of Lebna which is situated in the Cap Bon peninsula in the North-East of Tunisia, climate varies from sub-humid in the extreme upstream of the basin with rainfall over 600 mm/year, to semi-arid regime over the eastern part, with rainfall below 500 mm/year (Bortoli et al, 1969).

The data set collected was based on farmers surveys conducted on a sample of 243 agronomic situations (i.e. the combination of a field, a year and a previous crop) of rainfed durum wheat which are representative of the diversity of farmers' practices, in our study area. A first survey was conducted in 2011/2012 on 115 agronomic situations in Fernena and the second was carried out on 128 agronomic situations in the Lebna catchment, for 2012/2013 and 2013/2014 seasons. The various preceding crops were: cereals (wheat, barley, and oats), vegetables (potato, onion and watermelon) and legumes (chickpea, vetch, medic and faba bean). The most prevalent soil at Fernena was a silty clay loam with an average organic matter content of 2 % (Table 14). In the Lebna catchment, soil textures were very variable ranging from clay to sandy loam according to the USDA textural triangle (Soil Survey Staff, 1998) with organic matter content varying from 0.5 % to 2.2 %. Organic matter content is not statistically different for the various previous crops, but it shows a high variation in each class of previous crop which might be due to intra-regional variability of soils or between regions

(Table 15). The resulting database contained information on wheat yields (grain and straw), nitrogen fertilization (N applied, number and date of N-application), previous crop in rotation sequences and other information about the crop management system.

Table 14. Agronomic situations surveyed in Durum wheat in Tunisia

Regions	Years	Agronomic situations	Soil texture	Organic matter (%)	Annual rainfall (mm)
Fernena	2011/2012	115	C-LC	Mean	2.07
				CV (%)	22.50
Lebna	2012/2013	128	LC-SLC	Mean	0.88
	2013/2014			CV (%)	53.04

C: clay, LC: silty clay loam, SLC: sandy clay loam

Table 15. Soil Organic Matter content (%) across the previous crop

Previous crop	CE	CM	LG
Mean	1.40	1.52	1.08
CV (%)	54.44	54.31	45.01
Min	0.49	0.49	0.47
Max	2.75	2.81	2.22

CE: cereals, CM: vegetable crops, LG: chickpea and other legumes

2.3. Calculated variables for the use of Tunisian data

For the Tunisian database, due to lack of data on N uptake, which is a classical situation in farmers' fields networks, we established a simple model to estimate N uptake for each field, taking into consideration that N uptake by durum wheat is the sum of N in grain and straw (Ayadi et al, 2014):

$$(Eq. 3) \text{ N uptake} = (DM \text{ grain} \times \%N \text{ grain}) + (DM \text{ straw} \times \%N \text{ straw})$$

To parameterize this model, we collected published data on N concentration (grain and straw), dry matter (grain and straw), harvest index (HI) and nitrogen harvest index (NHI) from experimental results on durum wheat in different regions and with a wide range of climate, soils, varieties and management type (Table 16).

Table 16. Bibliographic data

Country	Number	Years	Treatment	Reference
Spain	12	1996, 1997 and 1998	N-supply	López-Bellido and López-Bellido, 2001
Tunisia	6	2009 and 2010	N-supply	Ayadi et al, 2014
Italy	6	1999 and 2000	N-supply	Giorgio and Montemurro, 2006
India	10	1975	Cultivar	Desai and Bhatia 1978
			N-supply	
Mexico	18	1995 and 1996	Cultivar	Ottman et al, 2000
			Irrigation	
			N-supply	
California	10	1993	Cultivar	Ehdaie and Waines, 2001
Tunisia	4	2013	N-splitting	Melki et al, 2015

In addition to this literature survey (Table 17), we implemented an experimental trial with four randomized blocks at the INRA experimental station in Montpellier, for the four durum wheat varieties used by farmers in Tunisia (Karim, Nasr, Maali and Razek). We measured N concentration, dry matter and harvest index for these four varieties (Table 17). Results suggest that there was no significant difference of N concentration in grain and straw between varieties (Table 17) which were all also very close of the average value of the durum wheat varieties reported in bibliography.

Table 17. Average of dry matter, nitrogen concentration in grain and straw and harvest index in bibliographic and experimental data on the four Tunisian varieties

Bibliographic data	Grain		Straw		Harvest Index	
Number=66	DM (kg/ha)	Ngrain (%)	DM (kg/ha)	Nstraw (%)	HI	NHI
Mean	4771	2.17	6949	0.48	0.43	0.78
CV (%)	42.9	13.2	43.1	37.9	20.7	11.1
Experimental data						
Number=16						
Mean	5039	2.06	3985	0.48	0.56	0.84
CV (%)	13.4	5.0	17.8	8.1	2.8	1.1

DM: Dry matter, HI: Harvest index, NHI: Nitrogen harvest index

Since N concentration in straw was highly variable across the data set of Table 17 (CV of 37.9 % for straw compared to 13.2 % for grain) it was not possible to estimate N uptake using N content in grain and straw as parameters (Eq.3). On the contrary, Nitrogen Harvest Index had a low variability across the whole data set of Table 17 (e.g. CV of 11.1% across 66 agronomic situations). Thus, we considered that the best model to estimate the amount of N uptake by durum wheat in each Tunisian farmer's field would be given by Eq.4 with one variable (DM grain) depending on the agronomic situation and two parameters (%Ngrain and NHI) kept constant across all situations:

$$(Eq.4) \ N \ uptake = \frac{DM \ grain \times \%Ngrain}{NHI}$$

This estimation entails using a linear function to describe the relationship between yield and N uptake instead of a polynomial function (Eq. 2) with downward concavity, as recommended by Spiertz and De Vos (1983). This model was evaluated on the same experimental data set (Fig. 39) from ICARDA's research station at Tel-Hadya as for the consistency check of the four quadrant framework (see part 2.1). A common measure of model quality is the Relative Root Mean Square Error (RRMSE), which corresponds to the square root of the average errors between simulated data and measured data, divided by the average of the measured data (Wallach et al, 2014). Here, the model simulated reasonably well N uptake with a RRMSE of 18.7%, which corresponds to an average error lower than 40 kg/ha. However, this relative

error on prediction increased when the Nitrogen input became greater: as far as N uptake remained between 40 to 80 kg/ha, the dispersion of observations (i.e. the RMSE) increased symmetrically around the simulated values. Then, from 90 kg/ha, the model systematically underestimated N uptake. Since the model was based on grain biomass, this bias could be due to the negative correlation between the nitrogen concentration in grain (%N grain) and yield as shown by Bogard et al. (2010) on wheat.

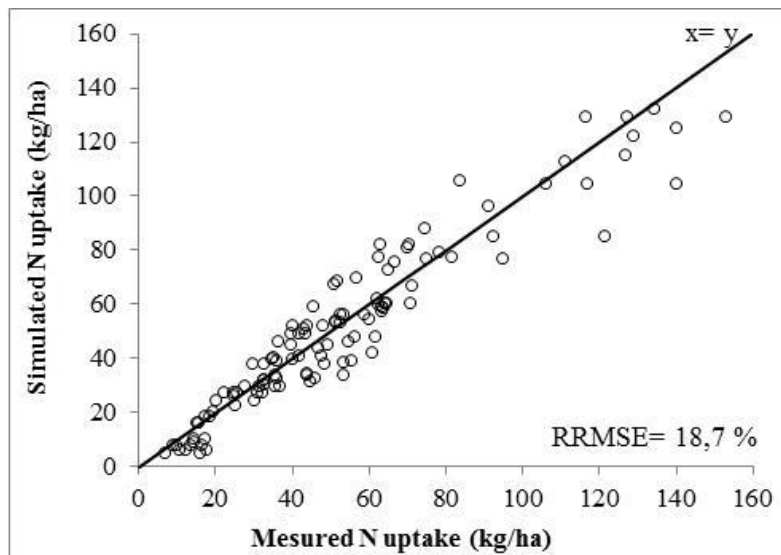


Figure 39. Simulated versus measured N uptake by durum wheat in ICARDA’s experimental station

2.4. Determination of boundary curve parameters for wheat in different cropping systems

Using data from Tel Hadya station, and then Tunisian data across farmers’ fields, distinct boundary curves for N capture efficiency (Eq. 1) were fitted according to rotation type. These curves were further used to analyze relative N uptake gap (i.e. distance between each farmer’s field and the efficiency frontier of its rotation).

Forage legumes (medic and vetch) and lentil were grouped together into a single category named “other legumes”, both for the Tel Hadya data set and for the Tunisian data set (for vetch, medic and faba bean). Indeed, according to Ryan et al. (2007), these preceeding crop contributed to a quite similar amount of N to the following durum wheat but higher than chickpea. Similarly, experiments from Beck et al (1991) in the same experimental station during the same period showed that the apparent N budget of chickpea is negative while it is positive for lentil.

To estimate the parameters of the N capture eco-efficiency frontier (quadrant I), we first selected a series of points across the whole range of N-input for which N uptake was maximum using the procedure described by Shatar and Mc Bratney (2004). We then fitted a non-linear model (Eq.1) on this subset of point, and Nmax, k and r were estimated by the generalized least square generalized method ([www. R-project.cran.com](http://www.R-project.org)). In order to test whether eco-efficiency frontiers were different between rotations, we performed model comparisons on parameters Nmax, k, and r between these non-linear regression models with or without rotation as a fixed effect. We used the Akaike criterion (AIC) to decide on the best model: a global model (all rotation were adjusted on the same boundary curve with *nls* procedure), and a specific model (a rotation effect was introduced on every parameter of the boundary curve). This adjustment was done with *nls* and *gnls* functions from *nlme* packages that were used for non-linear regression in R.

Parameters of the boundary curve for N conversion (quadrant II) were also determined by fitting a non-linear regression model (Eq.2) on boundary points selected with the same procedure as above. This was possible only for the experimental data in Syria where the N uptake was measured and not in the Tunisian farmer's field (in absence of measurement of grain and straw N concentrations), where it was estimated by the model described in 2.3 which led to force the boundary curves of quadrant II to a linear shape. The error induced by this linear model compared to the expected non linear model of Eq.2 was estimated with experimental data set of Syria.

3. Results

3.1. Test of boundary curves shape on experimental fields in Syria (ICARDA)

Although it was adjusted to the same equation (Eq. 1), the relationship between N supply and N uptake was significantly different according to rotation type (Fig. 40a, Table 18). The highest value for maximum N uptake (Nmax parameter) was found for wheat grown after legumes (excluding chickpea), followed by fallow, then watermelon, and chickpea (Table 18). As expected from the literature, the lowest value for maximum N uptake was found for continuous wheat.

Table 18. Boundary curve parameters of the relationship between N uptake and N-input in ICARDA's experimental station, as well as Akaike criterions (AIC) of a simple model (nls) and complex model (gnls) testing differences between boundary curve of each rotation and the highest boundary curve. P-value stands for the test of adjustment for one specific rotation being significantly different from the highest boundary line

Previous crop	Fallow	Watermelon	Legumes	Chickpea	Wheat
Nmax	179.79	153.57	178.99	161.17	48.85
k	1.9301	2.1339	1.484	2.251	0.9226
r	0.0196	0.0265	0.0236	0.0195	0.0275
AIC (gnls)	159.85	166.52	417.01	155.97	134.00
AIC (nls)	234.90	259.55	411.01	277.33	335.91
p-value	<0.0001	<0.0001	1.00	<0.0001	<0.0001

Nmax: the maximum nitrogen uptake; k and r obtained by minimizing the root mean square error (RMSE)

Boundary curves representing N conversion into grain were also found significantly different depending on rotation type (Fig. 40b). Maximum yield were significantly higher for wheat grown after fallow and watermelon than after legumes and cereal crops. However, this difference was not as important as the difference between boundary curves of N capture (Fig. 40a). Although the polynomial model better fitted the data than the linear model (Table 19), the difference between both models was not significant for all crop rotations. This indicates that the simplification of the relationships in quadrant II due to lack of data on N uptake (see part 2.3) should not impact the comparison between preceding crops regarding N uptake efficiency.

The trade-off curves between N-use efficiency and production were also significantly different according to rotation type. For each level of N-input, the trade-off between yields and N-use efficiency was better for diversified rotations, especially with fallow- and legumes-wheat rotations, than for wheat monoculture.

Table 19. Comparison of models used to establish boundary curves of the relationship between N uptake and yield for each rotation based on Akaike criterion (AIC) and residual sum of squares (RSS)

	Previous crop	Fallow	Watermelon	Legumes	Chickpea	Wheat
Model 1:	RSS	1.391	0.428	1.855	0.457	0.190
ax	AIC	11.838	-5.100	-4.113	-4.172	-21.552
Model 2:	RSS	0.365	0.393	1.499	0.391	0.152
ax² + bx	AIC	-3.570	-4.291	-10.408	-4.381	-23.075

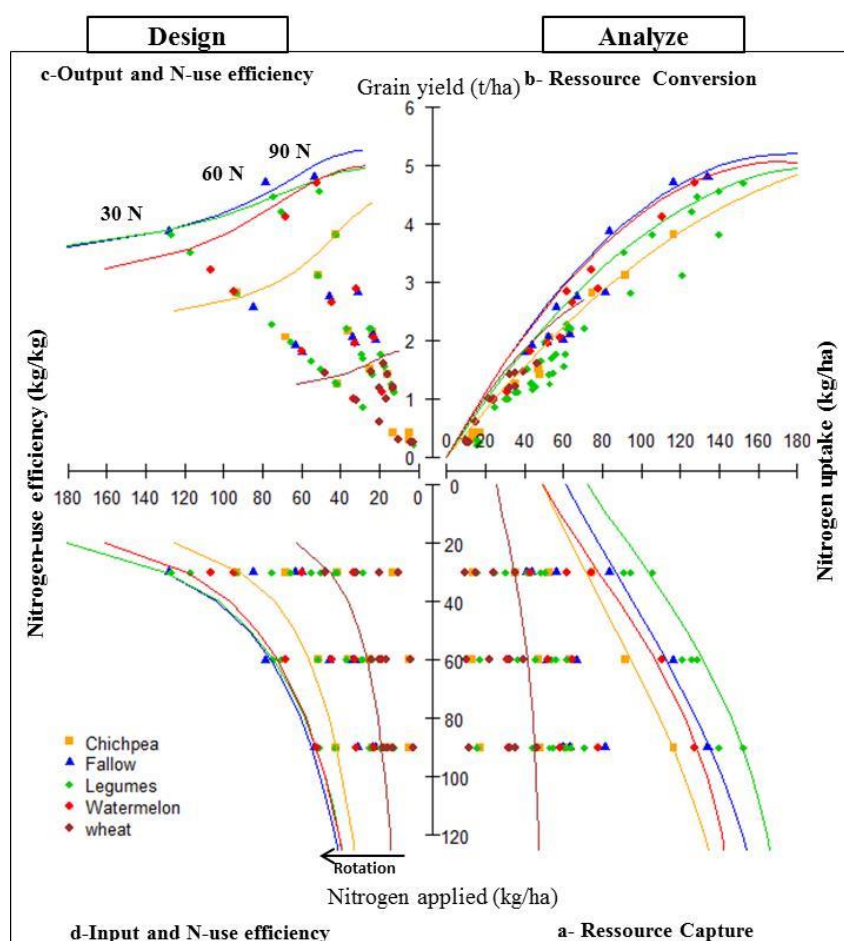


Figure 40. Four-quadrant diagram based on experimental data in ICARDA's experimental station, showing individual field measurements and boundary curves of the relationship between (a) nitrogen applied and nitrogen uptake, (b) nitrogen uptake and grain yield, (c) grain yield and nitrogen efficiency and (d) nitrogen efficiency and nitrogen supply for each previous crop in the rotation: Fallow, Watermelon, Legumes, Chickpea and Wheat

3.2. Effect of diversified rotations on wheat N uptake in Tunisian farmer's fields

Boundary curves between N uptake and N-input were again found significantly different according to rotation type (Fig. 41a, Table 20). Despite the large variability of N uptake for a given level of N-input levels, a large difference was found in maximum N uptake (Nmax) between wheat grown after cereal and wheat in diversified crop rotation. The highest value for Nmax was obtained for a wheat grown after a legume (165 kg/ha), followed by vegetables, and chickpea. By contrast, the lowest value for Nmax was found for wheat in cereal-wheat rotation (98 kg/ha). The highest N capture efficiency was found for wheat grown after legumes (2.14 and 1.33 kg N uptake/kg N applied, for 60 kg applied N/ha and 120 kg N/ha respectively) while the lowest N capture efficiency was found for continuous wheat (1.3 and 0.78 kg/kg). Rotations with vegetables and chickpea resulted in intermediate values of N capture efficiency of durum wheat (Fig. 41a, Table 20).

Table 20. Boundary curve parameters of the relationship between N uptake and N-input in farmers' fields and Akaike criterion (AIC) comparing a simple model (nls) and complex model (gnls) testing differences between boundary curve of each rotation and the highest boundary curve. P-value stands for the test of ajustement for one specific rotation being significantly different from the highest boundary line.

Previous crop	Cereals	Legumes	Vegetables	Chickpea
Nmax	98.7	165.1	123.5	119.5
k	1.280	2.699	8.006	2.059
r	0.027	0.037	0.069	0.025
AIC (gnls)	1077.6	903.2	509.2	360.6
AIC (nls)	1623.8	897.2	701.3	602.1
p-value	<.0001	1	<.0001	<.0001

Nmax: the maximum nitrogen uptake; k and r obtained by minimizing the root mean square error (RMSE)

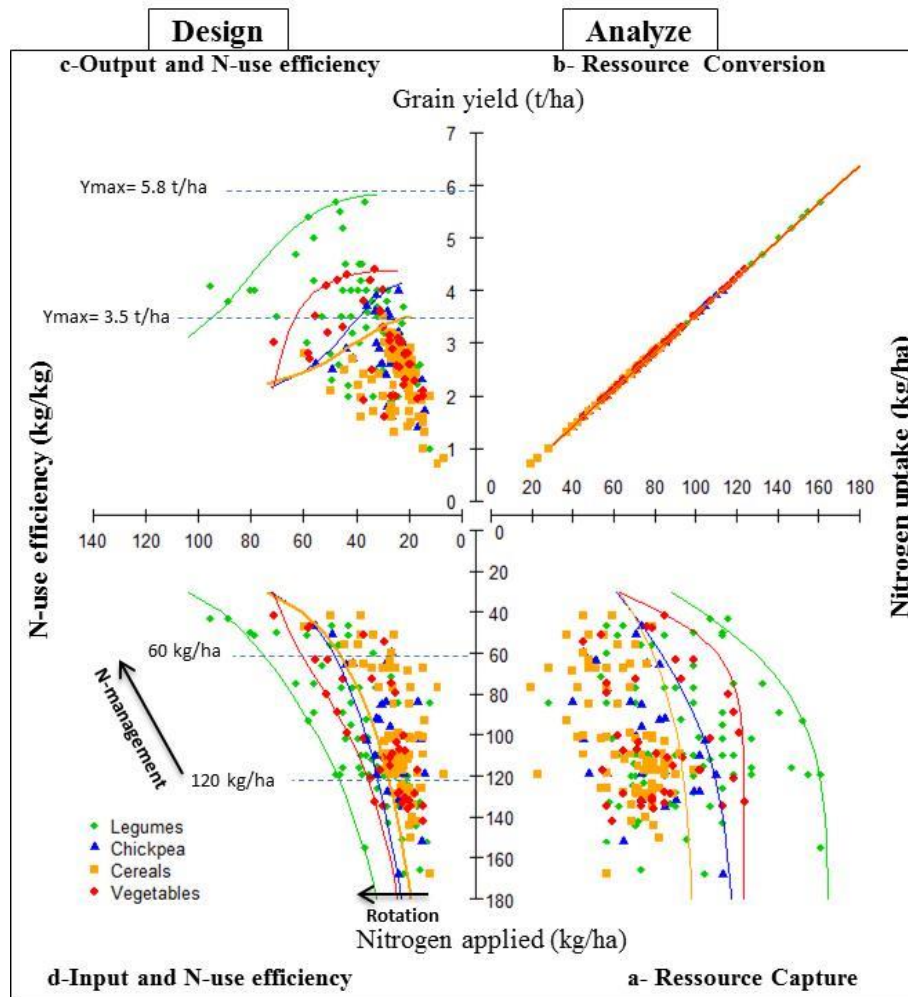


Figure 41. Four-quadrant diagram based on data collected across farmers' fields in Northern Tunisia showing the relationship between: nitrogen supply and nitrogen uptake (a), nitrogen uptake and grain yield (b), grain yield and nitrogen efficiency (c) and nitrogen efficiency and nitrogen supply (d) for each previous crop in the rotation: Cereals, Vegetables, Legumes and Chickpea

3.3. Nitrogen uptake gap

Due to the structure of error on N uptake prediction (see part 2.3), estimated values of N uptake were not judged reliable enough to analyze the effect of rotation on N conversion in farmers' fields in quadrant II. However, this modeling attempt was successful in demonstrating the consistency of the framework (Quadrant II) showing that a linear relationship can be used for boundary curves in quadrant II and that most of the effect of rotation was occurring in N capture (quadrant I). Higher potentials of N uptake by durum wheat were observed in diversified rotations in comparison with cereal-wheat rotations (Fig.

41a). However, a large variability (from 0 to 81 %) was observed in N uptake gap (Fig. 42). The average relative N uptake gap across the whole data set was 30 %. In case of durum wheat grown in rotation with chickpea or in cereal monoculture, more than 60% of farmers' fields had relative gaps lower than average. By contrast, 70 % of farmers' fields with legume-wheat rotations had relative gaps higher than average. At intermediate position, 50 % of farmer's fields with vegetable-wheat rotations had N uptake gap lower than average. There is no relationship between N uptake gap and the level of N applied, since any level of N input could result equally in any type of gap (not shown).

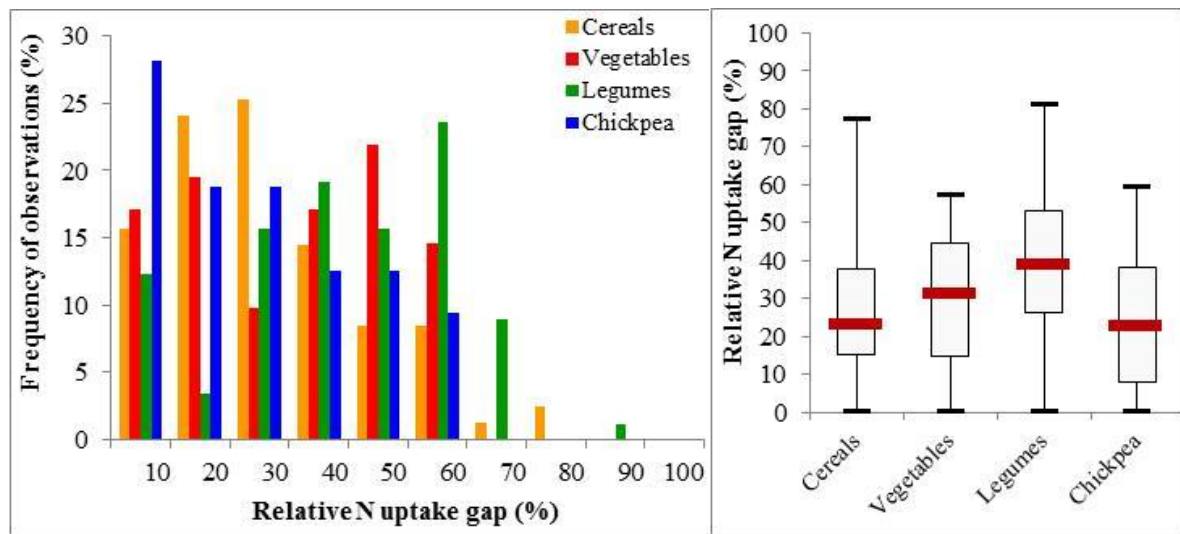


Figure 42. Frequency distribution for the relative gap of nitrogen uptake for each previous crop in the rotation: Cereals, Vegetables, Legumes and Chickpea

3.4. Trade-off analysis between N input efficiency and grain productivity

In cereal-wheat rotation systems, the trade-off analysis show that, the highest N-use efficiency (60 kg grain/kg N applied) was associated to a low grain yield (2.8 t/ha) and a low level of fertilization (Fig. 41c, d). Diversifying the preceding crop did not change the global trend but created new trade-off curves and allowed both an increase in yield and in N-use efficiency, especially in the case of legume- wheat rotations (Fig. 41c). Although less beneficial, vegetable - wheat and chickpea - wheat rotations were also potentially more efficient than cereal-wheat rotations (Fig. 41c). However, a large variability was observed among farmers' field regarding the relationships between N-use efficiency and yields (from 23 to 80 kg/kg with a yield of 4 t/ha) and between N-use efficiency and N-input (from 25 to 78 kg /kg with 50 kg of N applied).

4. Discussion

Crop yield can be impacted by many limiting and reducing factors such as water, nitrogen, weeds, diseases and pests. Boundary curves analysis has been widely used by agronomists since the 90' to understand the causes of yield variability and to estimate potential yield and crop yield gap. In this study, we propose to improve the analytical approach by decomposing N-use efficiency within a new analytical framework, allowing both a functional analysis (quadrants I and II) and a trade-off analysis (quadrants III and IV).

4.1. A data-parsimonious functional analysis of previous crop effect on N use efficiency across farmers' fields

The right hand part of our framework allow to use easy-to-access field data (e.g. amount of N applied, grain and straw yields, grain and straw N content) for a functional analysis of the effects of crop rotation (e.g. nature of previous crop) and management (e.g. N fertilization) on resource use efficiency in durum wheat-based systems. The robustness of our framework relies in its ability to disentangle the effects of physiological processes (uptake vs conversion), using only simple and easy to access data, while the lack of field measurements for grain and straw N content in most databases, usually prevents farmers, advisers, scientists from correctly addressing processes underlying grain development and filling.

Our results confirm that cereal monocultures have poor N uptake potentials in comparison with more diversified rotation. As suggested by López-Bellido and López-Bellido (2001), there is therefore an opportunity to significantly improve N capture efficiency of durum wheat cultivation by diversifying crop rotations. The highest efficiency frontier of N capture was found for wheat grown after legumes (vetch, medic and faba bean). Legumes had probably higher fertilizing effects than other previous crops, because of soil N enrichment through symbiotic N-fixing processes (Voisin et al, 2015). Legumes could also have improved soil structure, by increasing soil aggregates stability and soil porosity (Masri and Ryan, 2006) therefore promoting soil N mineralization and plant absorption, and may have limited weeds, pests and diseases specific to wheat. Chickpea, which is also a legume crop, had a lower effect than other legumes probably because of its lower N fixation efficiency, leading to less input from the atmosphere, and of its higher NHI, leading to a lower return to soil through crop residues (Beck et al, 1991). From the equation of the boundary curve in Fig. 41a, we hypothesize that processes acting on soil N availability would explain the increase along the x-intercept (parameter k in Eq. 1) while processes acting on other limiting factors would explain the increase in the asymptote (parameter N_{max} in Eq. 1). The third parameter (r in Eq. 1)

could reflect the method of N application and especially the timing with regards to plant stages and the form of mineral fertilizers that could influence the efficiency of nitrogen capture (López-Bellido et al, 2005). Our dataset did not allow a deeper analysis of biophysical processes and how they were related to farming practices. For example, the beneficial effect of vegetables in the rotation, especially on k parameter, could have resulted from an overfertilisation during the vegetable crop cycle, which is quite common for such type of crops, leaving then N surplus for early stages of durum wheat.

4.2. Variability of nitrogen uptake gap in durum wheat in Tunisia

The analysis of N capture efficiency by durum wheat can be performed for each rotation system using the gap between actual N uptake levels in the fields and potential values given by the corresponding boundary curves at the same amount of N applied (N uptake gap). Our results obtained in Tunisia show a high variability in N input and N uptake levels across farmers' fields, resulting in varying N capture efficiency (Fig. 42). Part of N-use efficiency differences may depend on N management and application, e.g. N was applied not at the right plant stage or was followed by a dry event resulting in immobilization in soils or a wet event resulting in N leaching. In Tunisia, N fertilizers are generally applied at late stages, e.g. after apical differentiation, and only if the beginning of the growing season had enough rainfall (Latiri et al, 1998). This can alter final protein composition and N accumulation in the spike (Ayadi et al, 2014). As shown by Porter and Christensen. (2013), the analysis of N capture efficiency would require adding other intermediate variables (e.g. soil N availability), splitting quadrant I by adding a soil N availability axis, and allowing further analysis of limiting factors in farmers' fields. Since our network was based on rainfed durum wheat only, it is likely that soil water deficit could explain a large part of N uptake gaps, especially by lowering wheat absorption rates. In the South Mediterranean, it was largely proved that water deficits affect many plant processes involved in biomass production and N uptake (Latiri et al, 1998; Albrizio et al, 2010; Quemada et al, 2016). Finally, biotic factors such as weeds, pests and diseases could also impact N capture efficiency at different levels. Our data did not allow further analysis of these processes as this would require an extension of the framework to other state variables of the agrosystem such as P uptake or weed biomass at harvest as shown for example by Delmotte et al. (2011) on rice.

Overall the preceding crop in a rotation had both an influence on potential N uptake (Fig. 41a) and on the distribution of N uptake gaps (Fig. 42). For instance, diversifying rotations with legumes shifted the boundary curve towards higher N uptake levels and increased at the same

time the frequency of high relative absorption gaps in comparison with cereal- or chickpea-wheat rotations. Under field conditions, the combination of these two effects could therefore result in a much lower positive net effect on N absorption and yields of durum wheat than suggested by the shift of the boundary curves. It is likely that diversifying rotations are key to create high potentials of N absorption by durum wheat through their positive effects against weeds, pests and disease. However, the risk of N deficit if the N-effect of the preceding crop is not sufficient and/or the risk of shifting the hierarchy of limiting factors towards another factor such as soil water deficit (Hochman et al, 2014) clearly remains.

4.3. Towards the Design of sustainable cropping systems

The analysis of the relationship between N-use efficiency and yields (quadrant III) or N input (quadrant IV), based on the boundary curves obtained for each rotation system, showed a wide range of N-input efficiency (from 6 to 95 kg grain/kg N applied). This variability was driven by the two components of the efficiency ratio: N-input and yield. The highest N efficiencies were obtained with low amounts of N fertilizer (Fig. 41d) but were associated with the lowest grain yields (Fig. 41c). However, raising yields of durum wheat in the Mediterranean region is essential to meet the growing needs of a rapidly increasing population. There is therefore a fundamental trade-off between N-input efficiency and food production if the area devoted to cereal rotations is kept constant, which is the target in many regions to avoid deforestation and cultivation of soils prone to erosion.

Changing the preceding crop in a rotation created a new efficiency frontier that allowed to reach a better compromise between N-input efficiency and food production performance (Fig. 41c), especially if the level of N applied has to be limited for environmental purposes (Fig. 41d). Our results show that the gap between attainable yields of wheat grown after legumes (4.9 t/ha) and continuous wheat (2.9 t/ha) obtained with a low level of N-input (60 kg/ha) compensate a large part for the reduction of area allocated to wheat when introducing legumes in rotations. If we add the fact that legumes can produce food without N fertilization, the total amount of N used over a three years rotation will be reduced by one third, resulting in an increased food production and N-use efficiency while producing more diversified food.

5. Conclusion

Our four-quadrant framework allowed to combine a process-based and a design-oriented analysis of food production vs. resource use in cropping systems, making use of easy to access data in farmers' fields. Using data collected in long-term experiments in Syria and from farmers' fields in two Tunisian regions, we showed that new efficiency frontiers can be

achieved by diversifying crop rotation in cereal-based systems, resulting in higher yields and N-input efficiency potentials. In particular, crop rotation with legumes and vegetables improved N capture capacity of the system, highlighting tracks for designing eco-efficient cereal-based systems in the Mediterranean. Nevertheless the level and frequency of relative N uptake gaps showed that diversified crop rotations, especially legumes-wheat rotation created a higher potential by moving the efficiency frontier upwards, but didn't ensure the realization of this N uptake potential in most of cases. There are therefore other crop management factors to be taken into account in farmers' fields (irrigation, weed and pest control...) that could also improve nitrogen capture in combination with diversified rotations.

Chapitre 6 : Relation entre la production du blé dur en Tunisie et l'efficacité de l'eau

Objectifs du chapitre

L'objectif de ce chapitre est d'essayer d'élargir le cadre d'analyse de l'efficacité établi pour l'azote (Chapitre 4 et 5) à une autre ressource : l'eau puis d'analyser les interactions entre les deux. Dans une première étape, nous avons analysé la réponse du rendement et de la production de biomasse à la ressource en eau chez le blé dur suivant l'approche de facteur limitant (Passioura et Angus, 2010). Ensuite, nous avons proposé un cadre d'analyse théorique en introduisant la transpiration comme variable intermédiaire afin de séparer la captation et la conversion de la ressource. En revanche, dans ce chapitre nous avons présenté seulement la méthode d'estimation de la transpiration pour toutes les parcelles des agriculteurs en utilisant un modèle de bilan hydrique. Ce travail exploratoire nous a permis d'ébaucher une étude sur l'interaction entre les ressources eau et azote.

1. Cadre conceptuel

Dans de nombreux environnements, l'approvisionnement en eau est une source majeure de variabilité des rendements des cultures. L'évapotranspiration potentielle d'une culture peut varier considérablement en fonction du climat (pluies, températures, rayonnement...) et la réserve en eau des sols influence fortement la transpiration des plantes. Elle peut également varier en fonction des pratiques culturales, telles que l'approvisionnement en éléments nutritifs, les dates de semis et les variétés (Keating et al, 2010). Ces différents facteurs peuvent également avoir un effet sur l'efficacité de l'utilisation de cette ressource. Cette efficacité (EUE) dépend de l'eau totale utilisée au cours du cycle : elle est définie par le rapport entre la production de biomasse et l'eau totale utilisée qui correspond généralement aux apports hydriques par l'eau de pluie et d'irrigation (Kambou et al, 2013). Une partie de cette eau est perdue (évaporation, drainage, ruissellement), tandis que seule l'eau transpirée par la plante est véritablement utile à la production de biomasse. D'autres travaux ont défini l'efficacité de l'utilisation de l'eau comme étant la quantité de biomasse produite par quantité d'eau transpirée (Passioura et Angus, 2010). Pour la différencier de la première définition de l'efficacité énoncée plus haut, on considère ce rapport comme étant l'efficacité de l'eau transpirée.

1.1. Analyse de la réponse du blé dur à l'eau

Pour évaluer la réponse du blé dur à l'eau dans les trois régions de céréaliculture irriguée considérées en Tunisie (périmètres irrigués des régions de Jendouba, Siliana et Kairouan) (2.1, Chapitre 3), nous avons considéré que la quantité d'eau disponible durant le cycle de blé est la somme des précipitations entre Septembre et Juin auquel on ajoute le volume total de l'eau d'irrigation. En effet, dans une région méditerranéenne comme la Tunisie, la quantité d'eau emmagasinée dans le sol avant le semis du blé est très faible voire nulle après un été sec et chaud (Zhang et Oweis, 1999).

Les réponses du rendement du blé dur à l'eau disponible ont été analysées avec une courbe enveloppe représentant les situations où seule l'eau limite la production. Cette courbe a été établie à partir des points qui correspondent aux rendements maximums obtenus pour chaque quantité d'eau disponible. On peut en effet raisonnablement considérer, vu les niveaux de rendements observés, que notre échantillon contenait des points qui correspondaient à cette condition. Selon Passioura et Angus (2010), l'utilisation de l'eau par la culture n'est possible qu'au-delà d'une certaine quantité d'eau non productive qui est considéré comme perdue par évaporation. Par conséquent, pour modéliser cette courbe enveloppe, nous avons utilisé l'équation d'une droite affine (Eq.1) passant par l'axe des x (P+I).

$$\begin{aligned} \text{(Eq. 1)} \quad Y &= a(P + I) - b \quad \text{si } Y < Y_{\max} \\ Y &= Y_{\max} \quad \text{si } Y \geq Y_{\max} \end{aligned}$$

Avec Y est le rendement atteignable à chaque niveau d'apport hydrique (P+I), $Y_{\max}$, le niveau maximal observé de rendement. Au-delà d'une certaine valeur d'apport hydrique (P+I) avec laquelle le rendement atteignable (Y) a atteint le rendement maximal ($Y_{\max}$), on obtient un plateau égal à $Y_{\max}$. Les paramètres a et b sont des constantes avec a le rendement atteignable en grains par mm d'eau et b est l'ordonnée à l'origine qui représente la quantité d'eau évaporée par le sol et ne contribuant pas à la production. Les paramètres a et b ont été calculés à partir de l'équation de la courbe enveloppe qui représente les rendements maximaux pour chaque niveau d'apport hydrique.

Des courbes enveloppes des réponses de blé dur à l'eau ont été établies en fonction du type de rotation en classant le nuage des points en deux catégories : la première classe correspond aux rendements obtenus avec un précédent céréale y compris des cultures de blé dur, de blé tendre et d'autres céréales et la deuxième classe est pour les rendements obtenus avec des précédents

diversifiés comme des légumineuses (bersim, luzerne), des cultures maraichères (tomate, piment, pastèque) et la betterave sucrière.

Bien qu'il semble évident que le rendement du blé dur soit limité par l'eau sous un climat semi-aride comme la Tunisie, les réponses du blé dur à l'eau montrent une grande variabilité des rendements au niveau des trois régions (Figure 43). Par exemple, pour des apports (pluie + irrigation) de 400 et 500 mm, le rendement de blé dur varie de 2 à 6,5 t/ha. La courbe enveloppe des réponses de blé dur à l'eau (Figure 43) représente les rendements atteignables si on considère que l'eau, bien répartie à travers la saison de croissance et/ou stockée dans des sols à forte réserve utile, était le seul facteur limitant. C'est ce qui correspond dans l'analyse des écarts de rendement (« yield gap ») au rendement permis par l'eau (Van Ittersum et al, 2013). Dans notre cas, la pente de la droite enveloppe est de 17 kg grains/mm ce qui correspond à 1,7 kg de grains/m³ d'eau. Ceci n'est valable qu'au-delà d'une certaine quantité d'eau non productive qui est supposée représenter l'évaporation du sol (Passioura et Angus, 2010). Sous cette hypothèse on peut considérer que la pente de la droite enveloppe de la figure 43 (paramètre (a) de l'équation 1) représente l'efficacité de l'eau transpirée et non pas de l'eau utilisée par la culture (transpiration + évaporation). La valeur des pertes d'eau du sol par évaporation est légèrement supérieure à celle citée dans Passioura et Angus (2010) qui est de 100 mm, obtenue dans un climat similaire (Australie de l'Ouest). Cette courbe montre qu'il est possible d'obtenir des rendements supérieurs à 3 t/ha avec des quantités d'eau entre 300 et 400 mm. En outre, des rendements supérieurs à 4 t/ha ont été observés en présence d'environ 450 mm d'eau. Au-delà de 500 mm, les rendements du blé dur permis par l'eau montrent un plateau où ils représentent en moyenne des valeurs maximales supérieures à 6 t/ha et exceptionnellement une valeur de 7 t/ha. Ces résultats corroborent les travaux de Passioura et Angus (2010) en conditions similaires mais sur du blé tendre (Figure 27, Chapitre 2).

La figure 43.b montre que la réponse du blé dur aux apports hydriques varie selon le précédent cultural. Dans le cas de la rotation blé dur sur céréales (y compris le blé dur), le rendement maximal observé chez les agriculteurs est de 4,8 t/ha (I). Pour le blé cultivé après d'autres cultures de diversification (betterave sucrière, légumineuses, cultures maraichères), des rendements élevés ont été observés à différents niveaux d'apport hydrique. Ces rotations ont permis de créer un nouveau potentiel de rendement (6,6 t/ha) qui a permis de tracer une nouvelle courbe enveloppe (II) au-dessus de la première (I). La pente de cette courbe enveloppe est de 17 kg grains/mm d'eau transpirée alors qu'elle est de 15 kg grains/mm pour le blé dur cultivé après une céréale, suggérant une plus faible efficacité de l'eau dans un système de monoculture. Cependant, comme le nombre de données sur les parcelles conduites

en irrigué où les agriculteurs font blé sur céréales (17) est très limité par rapport à celui des parcelles où ils font des rotations (102), il n'est pas possible de réaliser un test statistique.

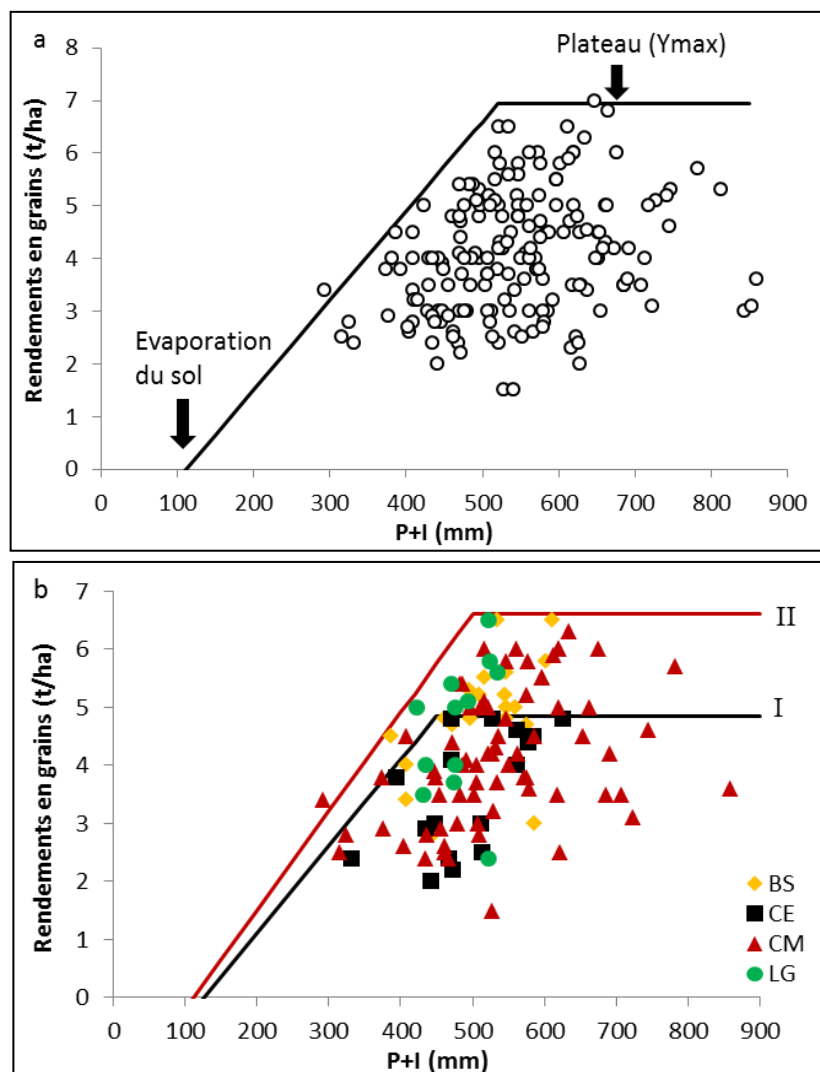


Figure 43. Relations entre les rendements du blé dur irrigué et la quantité d'eau disponible (P+I) comparées à une courbe enveloppe globale (a) et des courbes enveloppes en fonction des différents précédents culturaux (b) : céréales (CE) (I) et d'autres cultures de diversification (II) comme les légumineuses (LG), les cultures maraîchères (CM) et la betterave sucrière (BS).

1.2. Formalisation du cadre d'analyse de l'efficacité de captation et de conversion de la ressource

Pour aller plus loin dans l'analyse de l'efficacité de l'eau et des compromis production efficacité, nous avons repris l'approche développée sur l'azote (Figure 36, Chapitre 4) en introduisant des variables intermédiaires entre l'apport hydrique et le rendement. Dans une

première étape, nous avons introduit dans la partie droite la variable transpiration cumulée sur le cycle du blé dur pour séparer l'efficacité de la captation de la ressource hydrique et l'efficacité de sa conversion en grains (Figure 44).

Le premier quadrant (Figure 44.a) représente la relation entre la quantité d'eau transpirée par la culture et la quantité d'eau apportée (pluie et irrigation). Cette relation n'a pas été étudiée dans les travaux qui ont mené sur l'efficacité de l'eau pour la production céréalière (Passioura et Angus, 2010 ; Sadok et Sinclair, 2011). En effet, contrairement à l'azote absorbé qui a été utilisé comme variable intermédiaire pour le cadre d'analyse de l'efficacité de l'N, la transpiration cumulée ne peut pas être mesurée à la récolte. Pour déduire la forme de la courbe enveloppe qui représente la quantité d'eau transpirée en fonction de l'eau apportée lorsque l'eau est le seul facteur limitant, on se base sur l'équation de la courbe enveloppe de réponse à l'eau (Eq.1) et sur la relation établie par Tanner et Sinclair (1983) entre le rendement (Y) et la perte d'eau par transpiration (T) (Eq. 2) :

$$(Eq. 2) \quad Y \text{ (t/ha)} = T \times \frac{HI \times k}{VPD}$$

$$(Eq. 3) \quad T \text{ (mm)} = a \frac{VPD}{HI \times k} (P + I) - b \frac{VPD}{HI \times k}$$

HI est l'indice de récolte (ratio entre le rendement en grains et la matière sèche totale), k est un coefficient de transpiration (Pa) qui dépend de la physiologie de chaque espèce et VPD est la moyenne journalière de la pression de vapeur d'eau saturante dans l'air (Pa).

Le coefficient de transpiration k dépend de plusieurs facteurs qui sont relativement stables pour chaque espèce d'après Sadok et Sinclair (2011). Il dépend aussi d'un facteur climatique, la concentration atmosphérique en CO₂, que nous considérons comme identique pour toutes les situations étudiées. On peut donc considérer que k dépend principalement du génotype à travers le type de métabolisme photosynthétique (C3 versus C4) et la composition biochimique de la biomasse végétale (Tableau 21). Au contraire, l'indice de récolte pour la biomasse (HI) peut varier au sein de la même espèce (dans notre cas le blé dur). Pour cette espèce plusieurs travaux ont montré que HI peut varier avec le génotype (Araus et al, 2002; Condon et al, 2004; Passioura, 2004), même si dans le cas de nos variétés nous n'avons pas montré de différence significative du moins dans l'essai sur Montpellier (Tableau 5, Chapitre 3). D'autres travaux ont montré que cet indice peut être aussi influencé par le stress hydrique, notamment en affectant la captation de la ressource azotée pendant la période de remplissage

des grains (Vafa et al, 2014). Selon les travaux de Zhang et al (2008), des apports hydriques très faibles ou très élevés peuvent aussi affecter l'indice de récolte. Enfin, un stress hydrique modéré pourrait entraîner une floraison précoce du blé ce qui permet de gagner plus de jours pour le remplissage des grains avant l'arrivée des températures élevées du mois de juin qui réduit le remplissage des grains et accélère la maturité. Dans les quatre régions céréalières tunisiennes (2.1, chapitre 3), l'indice de récolte en biomasse (HI) obtenu dans les parcelles de producteurs de blé dur en sec et irrigué varie de 0,3 à 0,6.

Tableau 21. Coefficient de transpiration pour différentes cultures (Soltani et Sinclair, 2012)

Culture	Blé	Orge	Riz	Maïs	Sorgho	Soja	Tournesol	Pois chiche
k	5,8	5,8	5,8	9	9	4,5	4,5	5

Le VPD («Vapour Pressure Deficit») qui est la différence entre la pression de vapeur d'eau saturante de l'atmosphère à une température donnée et la pression de la vapeur réelle dépend de la température et de l'humidité de l'air (Sadok et Sinclair, 2011). Il varie donc principalement en fonction du climat et donc peut changer avec la région ou avec certaines techniques comme la date de semis. La VPD a été calculée en utilisant l'équation (Eq.4) qui a été appliquée pour chaque région, sur des données mensuelles des températures minimales et maximales (des normales calculées sur la période de 1961-1990). Ensuite, la moyenne annuelle des VPD mensuelles a été calculée (Annexe 7). Au niveau de ce deuxième quadrant, on peut considérer que la courbe enveloppe des rendements en grains en fonction de la transpiration est la droite qui représente les rendements dont l'indice de récolte est le plus élevé (HI= 0,6) et le VPD est le plus bas (VPD= 0,73 Pa) (de la région de Jendouba, Annexe 7), avec un coefficient de transpiration pour la culture de blé égal à 5,8 Pa (Soltani et Sinclair, 2012). Connaissant les valeurs de a et b de l'équation de la courbe enveloppe des réponses de blé à l'eau, nous avons établi la courbe enveloppe théorique mettant en relation la transpiration et les apports hydriques par la pluie et les irrigations (P+I) en utilisant l'équation (Eq.3).

Le deuxième quadrant (Figure 44.b) représente la conversion de la quantité d'eau transpirée en matière sèche de grains. La courbe enveloppe des rendements en grains atteignables par quantité d'eau transpirée est une droite passant par l'origine, d'après la relation (Eq.2) établie entre le rendement en grains (Y) et la perte d'eau par transpiration (T) (Tanner et Sinclair, 1983).

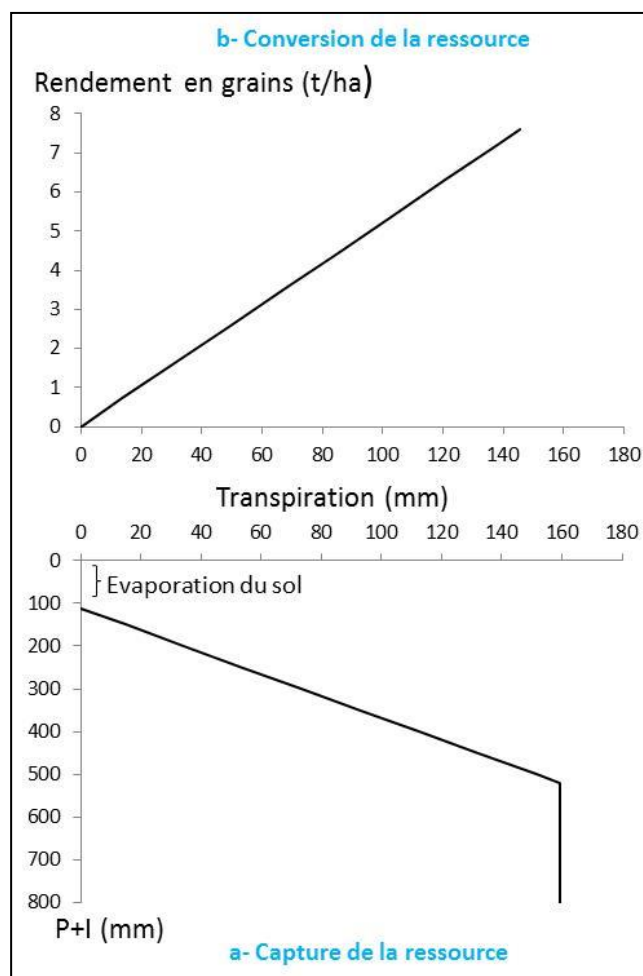


Figure 44. Courbes enveloppe théoriques obtenues sur le blé dur en Tunisie en séparant l'efficacité de la captation (a) et de la conversion (b) de la ressource hydrique

2. Modèle d'estimation de la transpiration

Le modèle SSM-wheat, qui a déjà été utilisé sur le blé dans des régions semi-arides (Soltani et al, 2013) pourrait être mobilisé pour calculer la transpiration du blé dur dans chacune des parcelles des agriculteurs enquêtés dans les 4 régions céréalières Tunisiennes. Ce modèle qui permet de simuler la phénologie du blé, sa croissance et son rendement est dérivé du modèle général (blé) décrit par Soltani et Sinclair (2012). Il permet de compléter les résultats des travaux expérimentaux à l'aide de la modélisation mathématique du processus de développement des cultures en fonction des interactions entre le génotype, l'environnement et les pratiques culturales de production (Soltani and Sinclair, 2012 ; Soltani et al, 2013). Le modèle SSM-wheat simule le développement phénologique, le développement foliaire et la production biomasse totale et le rendement en grains, l'équilibre azoté de la plante et le bilan hydrique et azoté dans le sol (Figure 45) avec un nombre de paramètres plus faible que celui

des modèles comme STICS, APSIM ou CropSyst et sans procédure de calage de paramètres sur des mesures de biomasse et de rendement. Par ailleurs ce modèle est d'utilisation aisée à partir d'Excel.

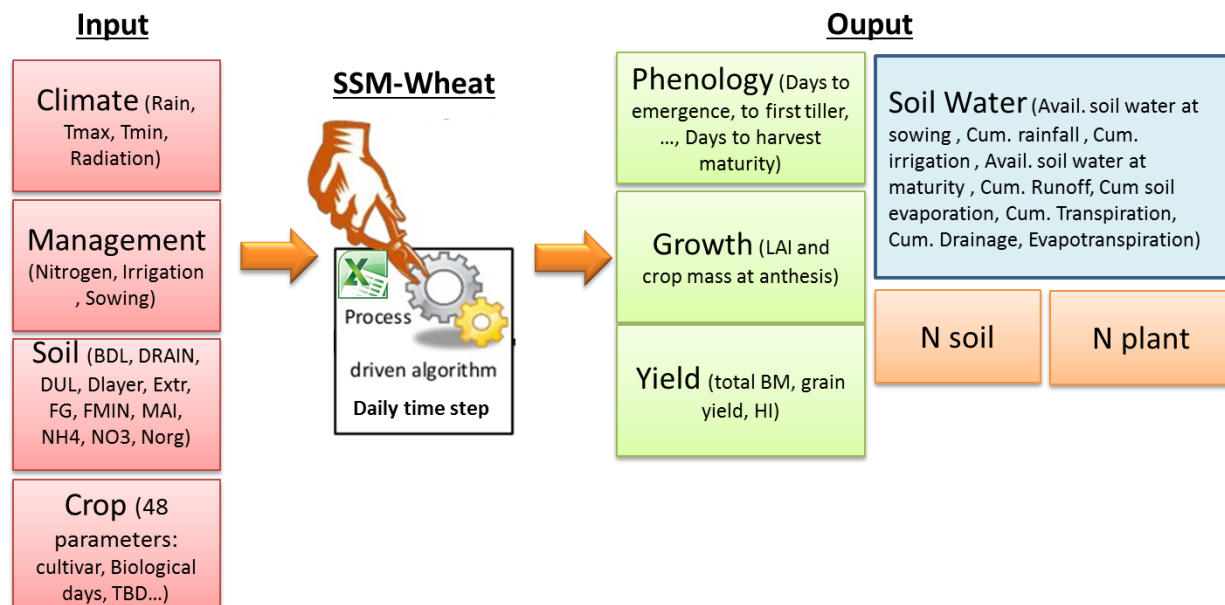


Figure 45. Schéma récapitulatif des entrées et des sorties du modèle SSM-wheat

2.1. Paramétrage du modèle

Les paramètres du modèle décrivent le sol, le climat, la plante et les pratiques culturales.

Paramètres Climatiques

Dans ce module on introduit la latitude, le VPDF et des données climatiques à pas de temps journalier (Pluviométrie, Température maximale et minimale et Rayonnement global) (Annexe 8). Le VPDF est un coefficient qui permet avec les pressions de vapeur de saturation calculée à des températures journalières maximales (VPTMAX) et minimales (VPTMIN) de calculer le VPD pondéré (Tanner et Sinclair, 1983) (Annexe 7). Le VPDF prend généralement des valeurs entre 0,65 à 0,75.

Paramètres du Management

Dans ce module, on décrit les interventions culturales suivantes : date et densité de semis, fertilisation azotée (quantité apportée, date et nombre d'apports), irrigation (quantité apportée, date et nombre d'apports) (Annexe 9).

Paramètres de sol

La simulation du bilan hydrique et azoté du sol nécessite des informations sur les propriétés physico-chimiques du sol. Pour chaque couche, d'épaisseur fixée par l'utilisateur, on renseigne les caractéristiques physiques du sol (Annexe 10): l'humidité volumique à la saturation (SAT), à la capacité au champ c'est à dire après arrêt du drainage rapide (DUL pour « Drained Upper Limit »), le volume d'eau pouvant être extrait par la plante (EXTR), le facteur de drainage (DRAINF) : tous ces paramètres dépendent de la texture du sol. On informe également la charge caillouteuse (FG) de chaque couche et l'albédo de la surface du sol. La disponibilité en eau du sol doit être initialisée avec les paramètres MAI1 (couche supérieure) et MAI (profil de sol entier). On initialise aussi les variables chimiques du sol, couche par couche, notamment la quantité d'azote organique dans la couche supérieure du sol (NORG), la fraction d'azote organique disponible pour la minéralisation (FMIN) et les résidus d'azote minéral (NO_3^-) et (NH_4^+).

Paramètres plante

On introduit ici les paramètres spécifiques (Annexe 11) à la culture de blé dur comme les températures cardinales pour le développement (la température de base (TBD), la température optimale (TP1D) et la température maximale (TCD)). D'autres informations spécifiques à chaque variété de blé dur sont introduites dans le modèle, telles que les dates des différents stades de développement (levée, épiaison, floraison et maturité). Ces dates sont calculées en jours biologiques à partir de la date de semis. Les jours biologiques ont été calculés en tenant en compte de la sensibilité à la photopériode et à la vernalisation (Soltani et Sinclair, 2012) en utilisant l'équation suivante:

$$(Eq. 4) \quad \text{Jour biologique} = \frac{\sum \text{Températures moyennes pp}}{\text{TP1D} - \text{TBD}}$$

Avec Températures moyennes pp = Températures moyennes si pp > 15

= Températures moyennes $\times (1 - (0,004 \times (21 - \text{pp})))$, sinon

TP1D est la température optimale inférieure pour le développement et TBD est la température de base (égale à 0°C pour le blé). La photopériode (pp) a été calculée en utilisant un système d'équation qui a été développé dans les travaux de Soltani et Sinclair (2012) (Annexe 12). Pour l'azote on introduit la teneur en azote des grains et des pailles.

2.2. Calcul de la transpiration

Selon les travaux de Tanner et Sinclair (1983), la transpiration et la production de matière d'une culture sont liées car ces deux processus dépendent de l'ouverture des stomates pour la photosynthèse. Par conséquent, la transpiration journalière est calculée dans ce modèle à partir de la production journalière de matière sèche (DDMP), de la pression de vapeur saturante (VPD) et du coefficient d'efficacité de transpiration (k) qui dépend principalement de la voie photosynthétique de la culture (plante C3 ou C4) et de la concentration en CO₂:

$$(Eq. 5) \quad Transpiration (mm j^{-1}) = \frac{DDMP \times VPD}{k}$$

2.3. Evaluation du modèle

Afin d'évaluer le modèle SSM-wheat, nous avons utilisé les données issues de l'expérimentation conduite à Montpellier avec les quatre variétés de blé dur utilisées par les agriculteurs dans notre réseau de parcelles en Tunisie (Karim, Maali, Razzak et Nasr). Ensuite, nous avons comparé la biomasse en grains et en pailles, les dates des principaux stades phénologiques (germination, floraison, maturité) et la fraction du rayonnement intercepté (PAR) avec les mesures qui ont été effectuées dans les parcelles expérimentales.

La comparaison des simulations du modèle avec les observations du terrain montre que ce modèle simule bien les dates de germination, de floraison et de maturité physiologique des quatre variétés de blé dur Tunisiennes (Figure 46.a). Cependant, ce modèle sous-estime légèrement la biomasse en grains (Figure 46.b). La figure 47 montre que le modèle simule bien l'évolution de la fraction du rayonnement intercepté (PAR) à partir de la date de semis, sauf à la fin du cycle, où la valeur de ce paramètre est sous-estimé. Ceci pourrait être dû à une erreur de mesure, car à la sénescence, la fraction du rayonnement intercepté doit baisser.

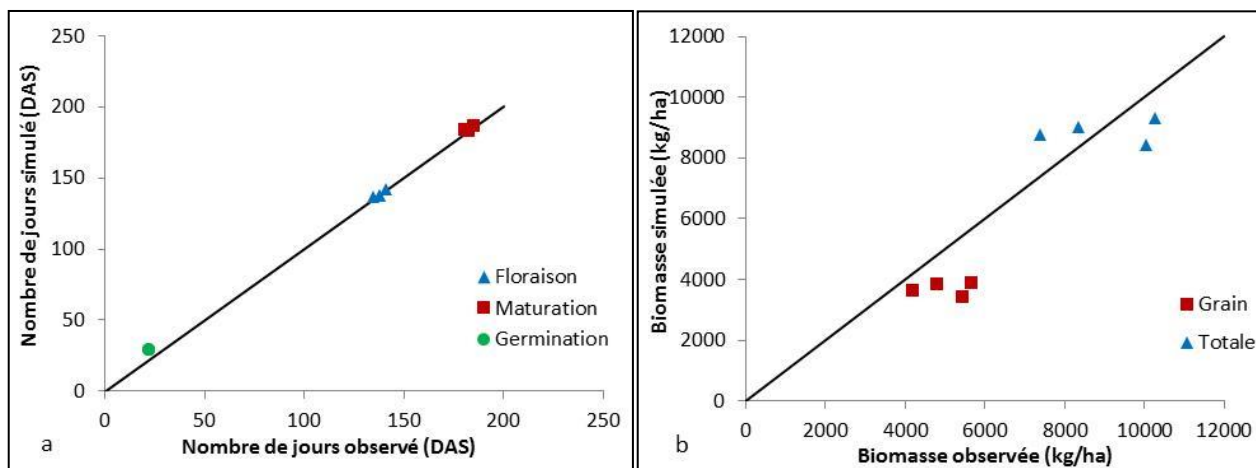


Figure 46. Comparaison des dates des principaux stades phénologiques (a) et de la biomasse en grain et totale (b), simulés par le modèle SSM-wheat, avec des mesures effectuées sur des variétés Tunisiennes de blé dur (Karim, Maali, Nasr et Razzak). (DAS : jours après le semis)

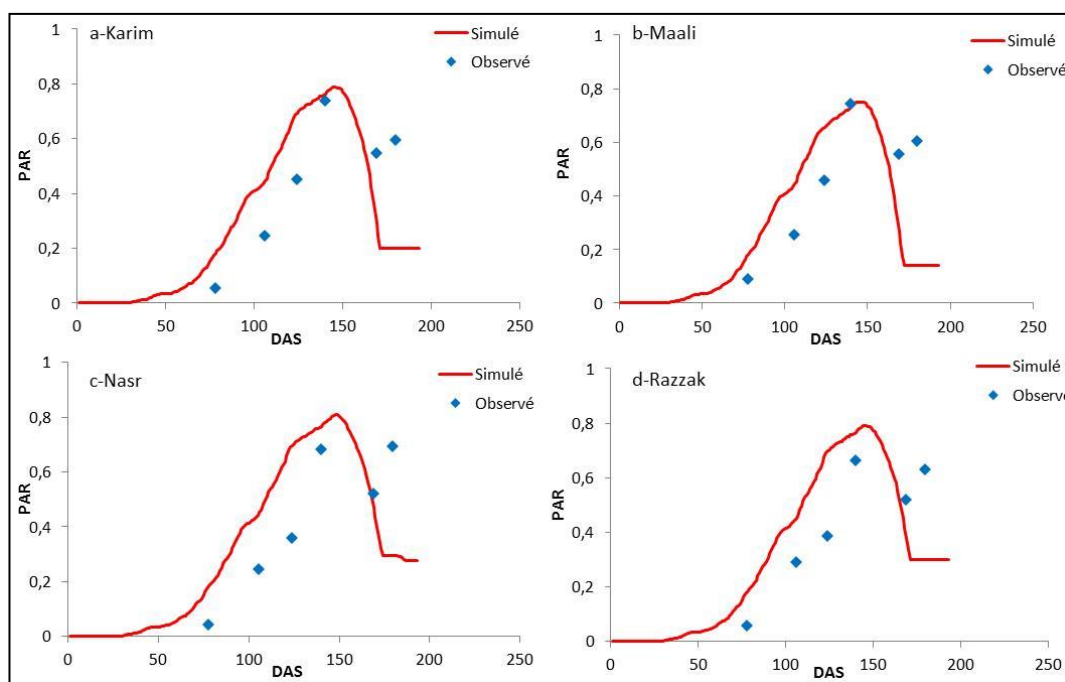


Figure 47. Comparaison de l'évolution de la fraction du rayonnement (PAR) simulée par le modèle SSM-wheat, avec des mesures effectuées sur des variétés Tunisiennes de blé dur (Karim, Maali, Nasr et Razzak). (DAS : jours après le semis)

2.4. Premiers résultats

Afin d'appliquer le cadre d'analyse de l'efficience de la captation et de la conversion de la ressource sur l'eau, nous avons utilisé les résultats du modèle SSM-Wheat obtenues sur les quatre variétés de blé dur cultivées dans l'essai expérimental. Toutefois, les résultats n'ont donné que quatre points qui correspondent aux rendements des quatre variétés, pour un seul niveau d'apport hydrique (Pluie = 239,5 mm + Irrigation = 50 mm). Pour obtenir un nuage de points permettant de tracer les courbes enveloppes, nous avons fait d'autres simulations en variant les apports hydriques par la pluie et les irrigations (Tableau 22). Le premier quadrant mettant en relation les apports hydriques (P+I) et la transpiration (Figure 48.a), montre que la transpiration ne démarre qu'à partir d'une certaine quantité d'eau non productive qui est supposée représenter l'évaporation du sol. La valeur de l'évaporation obtenue à l'intersection de la courbe enveloppe avec l'axe des y (P+I) est plus faible que celle obtenue au niveau des parcelles des agriculteurs en Tunisie. Le deuxième quadrant (Figure 48.b) montre une relation linéaire entre la transpiration et les rendements en grains.

Tableau 22. Nombre de traitement des résultats des simulations des variables permettant d'établir le cadre d'analyse (P+I, rendements en grains et transpiration)

Nb-Traitement	Variétés	Pluie (mm)	Irrigation (mm)
12	Karim	239,5	0
12	Maali	171,5	50
12	Razek	136,5	80
12	Nasr	-	100

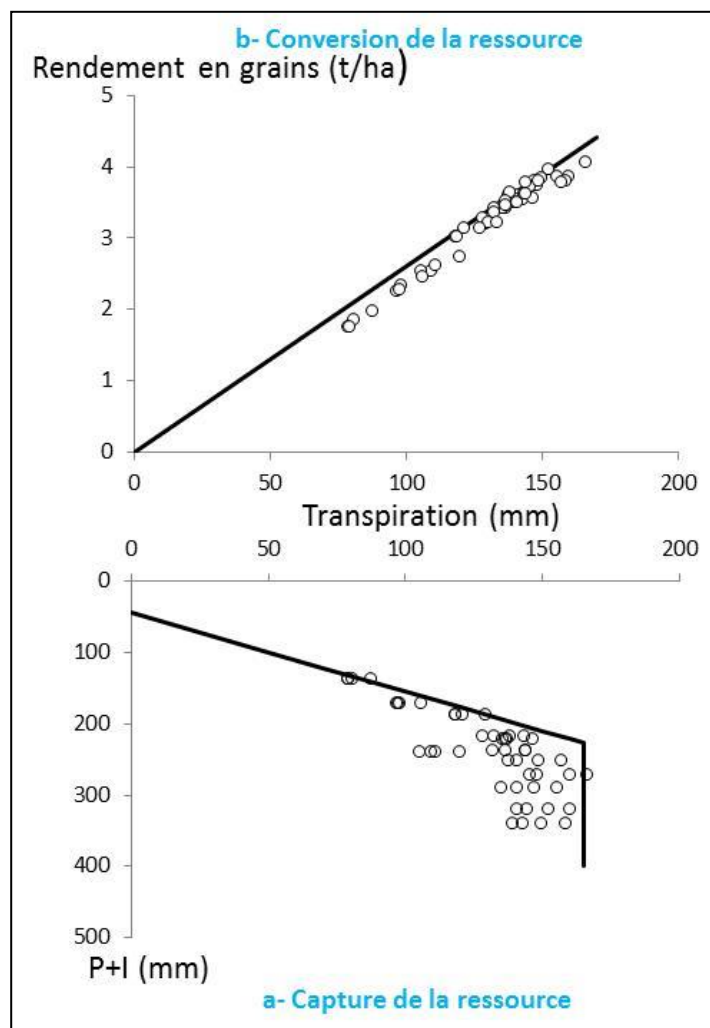


Figure 48. Courbes enveloppes obtenues pour quatre variétés Tunisiennes de blé dur cultivées dans un essai expérimental à Montpellier, de l'efficience de la captation (a) et de la conversion (b) de la ressource hydrique

3. Analyse de l'interaction eau/azote pour la production de blé dur

L'interaction entre deux facteurs de production est le fait que la réponse à un facteur est accentuée ou limitée par le niveau de l'autre. Les interactions peuvent concerner des facteurs qualitatifs (date semis, date d'apport d'engrais, nombre d'irrigations...) ou quantitatifs comme les quantités d'apports hydriques et azotés. L'interaction eau/azote a fait l'objet de nombreux travaux récents qui ont été centrés essentiellement sur les systèmes céréaliers des régions semi-arides (Quemada et al, 2016 ; Sadras et al, 2016 ; Sadras, 2005 ; Cossani et al, 2012). Selon les travaux de Sadras et al (2016), l'eau et l'azote sont liés de plusieurs façons. En conditions d'eau limitante, le déficit hydrique peut entraîner la réduction de la biomasse totale de la culture et de l'absorption azotée. Réciproquement, le manque d'azote pendant

l'expansion de la culture réduit l'indice de surface foliaire et augmente le ratio évaporation du sol sur transpiration. Les interactions eau/azote peuvent être également observées dans le processus de minéralisation de la matière organique, où l'eau favorise l'activité des microorganismes impliquées dans la décomposition de la matière organique (Murphy et al, 1998a). Cependant, des apports hydriques en excès peuvent être à l'origine de la perte d'azote au-delà de la rhizosphère par entraînement de l'azote en profondeur (lixiviation), ce qui peut donc entraîner des carences en cet élément chez les plantes cultivées et provoquer la contamination des eaux souterraines (Karrou, 2001).

Afin d'analyser l'interaction eau/azote pour la production de blé dur en Tunisie, nous proposons deux méthodes. La première se base principalement sur l'analyse des courbes enveloppes des réponses à un facteur en fonction du deuxième facteur (par exemple analyser les réponses à l'azote en fonction des apports hydrique ou l'inverse). La deuxième méthode consiste à analyser la distribution des écarts de rendement permis par un facteur (par exemple l'azote) en fonction de l'autre facteur (l'eau). L'écart de rendement permis par un facteur de production est la distance entre le rendement observé chez l'agriculteur et la courbe enveloppe des réponses à cette ressource (Paragraphe 1, Chapitre 4).

3.1. Analyse des réponses à l'azote en fonction du régime hydrique

La disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs principalement l'azote demeure le principal facteur limitant la production agricole (Mueller et al, 2012). Afin d'analyser la variabilité de l'efficacité de l'azote apporté pour la production de grain de blé dur en Tunisie, en fonction du régime hydrique, on a adapté l'approche de la frontière d'efficacité (Keating et al, 2010). Cette approche consiste à analyser les réponses de blé dur à l'azote par rapport à une courbe enveloppe qui représente les réponses maximales atteignables par le blé dur à notre variable qui est l'azote (Paragraphe 3, Chapitre 4).

L'analyse des réponses à l'N montre une différence significative entre la frontière d'efficacité d'N pour la production du blé dur en sec ($Y_{max} = 5,9$ t/ha) et celle du blé dur conduit en irrigué ($Y_{max} = 7,4$ t/ha) (Figure 49, Tableau 23). En effet, la comparaison de la courbe enveloppe du blé dur en pluvial par rapport à la courbe la plus élevée a donné une valeur du critère d'information d'Akaike (AIC) du modèle spécifique (gnls) plus faible que celle du modèle global (nls). Ce résultat confirme ceux de Sayar et al (2007) sur l'évaluation de la productivité du blé dur en irrigué et en pluvial, qui ont montré l'influence du régime hydrique et de l'étag

bioclimatique sur le rendement en grains. Une différence entre les paramètres k et r de l'équation (Eq.1, Chapitre 4), qui influencent la teneur en azote du sol (l'ordonnée à l'origine) et l'efficacité de l'utilisation de l'azote, respectivement, a été observée. En effet, en conditions d'eau limitante, l'irrigation pourrait améliorer l'absorption de l'azote par la plante et par conséquent diminuer les pertes et augmenter l'efficacité de l'utilisation d'N (paramètre r) (Quemada et Gabriel, 2016). Quant à la disponibilité de l'azote dans le sol (paramètre k), elle a été légèrement augmentée dans les systèmes irrigués par rapport au pluvial. Cette augmentation pourrait être expliquée par l'influence de l'eau sur la disponibilité de l'azote minéral dans le sol (Quemada et Gabriel, 2016). Cependant, une grande variabilité des réponses à l'azote est observée pour le blé dur conduit en sec et en irrigué (Figure 49).

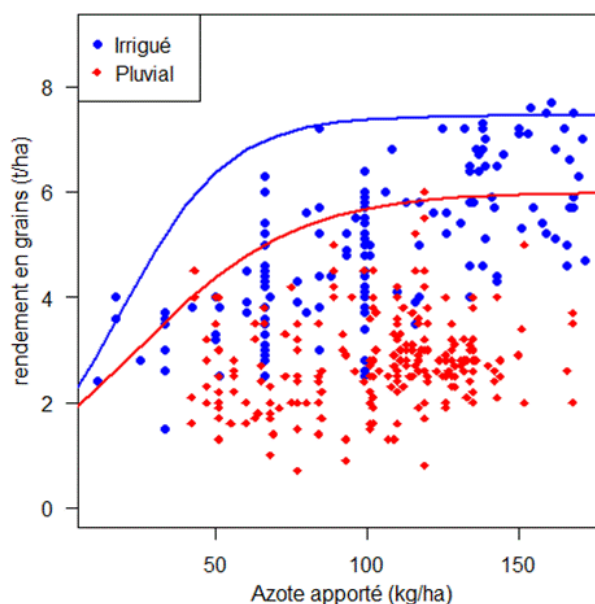


Figure 49. Réponses à l'azote du blé dur conduit en pluvial et en irrigué au niveau des parcelles d'agriculteurs dans quatre régions Tunisiennes (Jendouba, Siliana, Kairouan et le bassin versant de Lebna)

Tableau 23. Paramètres de la frontière d'efficacité et critère d'information d'Akaike (AIC) permettant de comparer la courbe de chaque mode de conduite (en pluvial, en irrigué) à la courbe la plus élevée

Conduite	Ymax	k	r	AIC (gnls)	AIC (nls)
Irrigué	7,52	3,716	0,055	150,51	151,82
Pluvial	5,95	2,437	0,035	362,19	1302,94

Cette variabilité pourrait s'expliquer par la présence d'autres facteurs abiotiques qui peuvent être liés à l'eau comme la distribution des apports hydriques au cours du cycle, aux itinéraires techniques comme le fractionnement de la fertilisation ou à la présence de facteurs biotiques ou abiotiques, autres que l'eau et l'azote. Cette variabilité peut être analysée à partir des écarts de rendements par rapport à la frontière d'efficacité d'N.

3.2. Analyse des écarts de rendements

L'écart de rendement relatif à la frontière d'efficacité d'N reflète la distance entre un rendement observé chez un agriculteur et la frontière d'efficacité d'N (Figure 49). Ces écarts relatifs varient de 0 à 90 % avec une moyenne de 41 % (Figure 50).

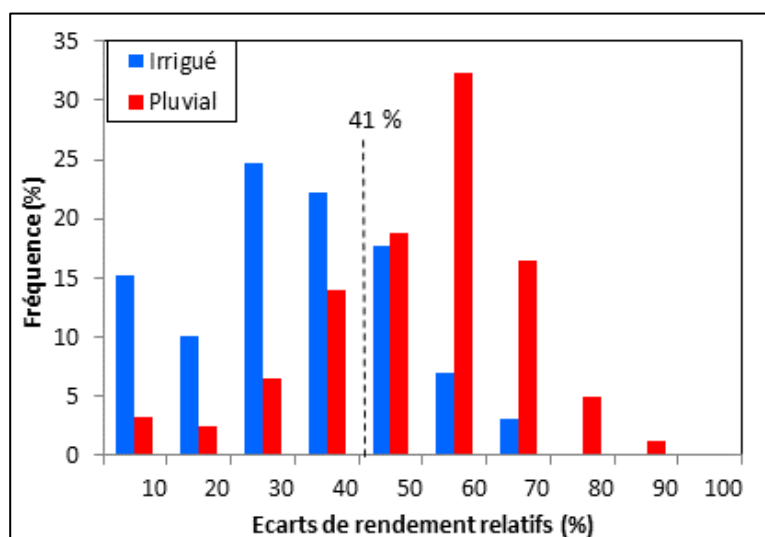


Figure 50. Fréquence des écarts de rendement par rapport à la frontière d'efficacité d'azote, du blé dur conduit en pluvial et en irrigué dans quatre régions Tunisiennes (Jendouba, Siliana, Kairouan et le bassin versant versant de Lebna)

Dans le cas du blé dur conduit en pluvial, plus de 70% des parcelles d'agriculteurs avaient des écarts relatifs supérieurs à la moyenne. En revanche, plus de 70% des parcelles conduites en irrigué avaient des écarts relatifs inférieurs à la moyenne. Par conséquent, l'écart au rendement potentiel pourrait être réduit avec l'irrigation, permettant l'amélioration de l'efficacité de l'azote.

Pour aller plus loin dans l'analyse des écarts de rendement relatifs par rapport aux frontières d'efficacité d'azote pour le blé dur conduit en sec et en irrigué, nous proposons de décomposer ces frontières d'efficacité (Figure 49), afin de caractériser les processus de

captation de la ressource (azote) et de sa conversion en grains (Paragraphe 2, Chapitre 4) en fonction du régime hydrique. La variable azote absorbé qui a été introduite entre le rendement et les apports azotés a été estimée pour les parcelles d'agriculteurs, avec un modèle simple à une seule variable (le rendement en grains) et deux paramètres (% N grains et l'indice de de récolte en N). Les frontières d'efficacité mettant en relation l'N apporté et l'N absorbé sont significativement différentes en fonction du régime hydrique (Figure 51.a). L'irrigation a amélioré le potentiel d'absorption azotée et l'efficacité de la captation de l'azote qui est représentée par la quantité d'azote absorbée par la quantité d'engrais azoté apportée à la culture. Ceci pourrait être expliqué par l'effet de l'irrigation sur la capacité de la plante à absorber l'azote et sur le processus de minéralisation de la matière organique du sol (Quemada et Gabriel, 2016). En revanche, même en présence d'irrigation, le nuage des points montre une grande variabilité de l'absorption azotée. En effet, dans les systèmes céréaliers des régions à climat semi-aride comme la région du Kairouan (au centre de la Tunisie), les apports hydriques par la pluie et l'irrigation pourraient être insuffisants pour améliorer l'efficacité de l'absorption azotée, surtout pendant des années sèches. L'excès d'eau pourrait aussi réduire l'efficacité de l'absorption azotée en augmentant les pertes d'azote par lessivage. Ces résultats corroborent les travaux de Quemada et Gabriel (2016) qui ont montré que l'efficacité de l'azote est maximale quand les apports hydriques sont proches des besoins de la culture, tandis que les apports sous ou sur-optimaux conduisent à la diminution de l'efficacité de l'azote.

La méthode d'estimation de l'azote absorbé au niveau des parcelles d'agriculteurs (2.3, Chapitre 5) ne permet de discuter le deuxième quadrant de la conversion de la ressource (Figure 51.b).

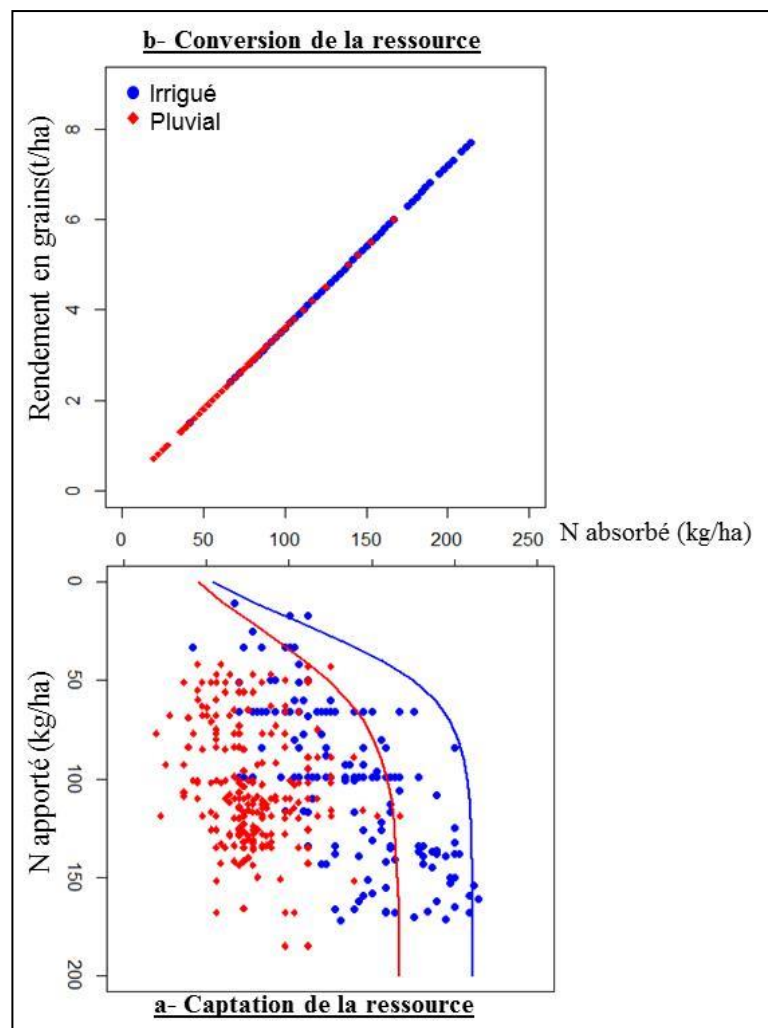


Figure 51. Diagramme à deux quadrants mettant en relation l’azote apporté et l’azote absorbé (captation de la ressource, a) et l’azote absorbé et le rendement (conversion de la ressource, b) du blé dur conduit en pluvial et en irrigué dans quatre régions Tunisiennes (Jendouba, Siliana, Kairouan et le bassin versant de Lebna)

Les apports azotés peuvent aussi influencer les écarts des réponses à l’eau qui représentent la distance entre la frontière d’efficacité de l’eau et les rendements observés chez les agriculteurs pour chaque apport hydrique (Figure 43). En effet, la relation entre les écarts relatifs des réponses à l’eau et les apports azotés montre une corrélation négative (Figure 52). Par conséquent, ces écarts de rendement par rapport à celui permis par l’eau diminuent avec l’augmentation des doses d’azote apportées.

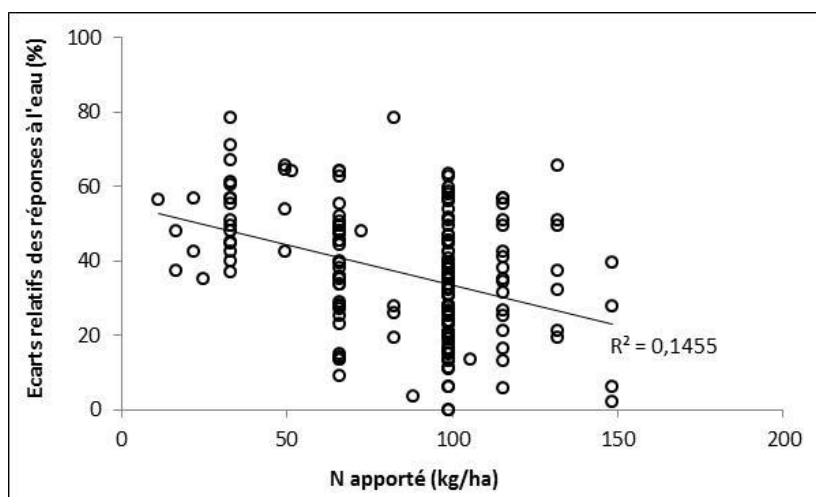


Figure 52. Relation entre les écarts de rendements à la frontière d'efficacité de l'eau et les apports azotés au blé dur conduit en irrigué dans trois régions Tunisiennes (Jendouba, Siliana, Kairouan)

La relation entre les écarts relatifs des réponses à l'eau et ceux des réponses à l'N montre une corrélation positive (Figure 53). En effet, des écarts de rendements élevés au rendement potentiel permis par l'eau sont bien corrélés avec les écarts élevés au rendement potentiel permis par l'azote. Ceci montre que ces écarts sont liés principalement à la présence d'autres facteurs limitants qui affectent les rendements de blé dur et par conséquent l'efficacité de ces deux ressources. En revanche, on remarque que la plupart des points ayant des écarts de rendements permis par l'azote faibles (les points les plus proches de la courbe enveloppe), ont des écarts de rendements permis par l'eau élevés. Il s'agit des rendements qui ont été obtenus avec des faibles quantités d'azote mais avec des apports hydriques élevés.

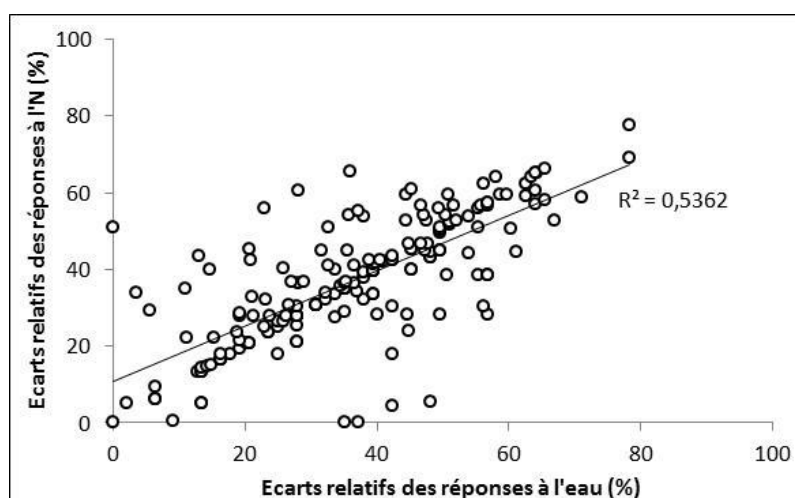


Figure 53. Relation entre les écarts relatifs des réponses à l'eau et les écarts relatifs des réponses à l'azote

Conclusion du chapitre

Suivant la même démarche de la décomposition de la frontière d'efficacité qu'on a appliquée pour l'azote (Chapitre 4 et 5), nous avons proposé dans ce chapitre la méthode d'établir un cadre d'analyse permettant d'analyser l'efficacité de la captation et de la conversion de la ressource hydrique. Dans une première étape, nous avons défini la forme de la courbe enveloppe mettant en relation les rendements de blé dur et les apports hydriques. Ensuite, nous avons utilisé ce cadre théorique de décomposition pour analyser la captation et la conversion de la ressource en introduisant la transpiration comme variable intermédiaire. En revanche, par rapport à l'azote absorbé, la transpiration est une variable difficile d'accès, et non disponible au niveau des parcelles des agriculteurs. Cependant, il existe de nombreux modèles de simulation du bilan hydrique permettent de calculer la transpiration comme le modèle SSM-wheat. Compte-tenu du manque de données pour paramétrer ce modèle et calculer la transpiration pour les parcelles d'agriculteurs, nous avons évalué dans la deuxième partie du chapitre, ce modèle avec des mesures obtenues dans un essai variétal réalisé à Montpellier avec des variétés Tunisiennes de blé dur. Les résultats des simulations ont permis de valider les formes des courbes enveloppes pour la captation et la conversion de la ressource. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons analysé les interactions eau/N en se basant sur les frontières d'efficacité de chaque ressource et les écarts de rendement par rapport au potentiel permis par l'eau et l'N. Cette analyse a montré d'importantes interactions entre l'eau et l'azote qui doivent être prises en compte par les agriculteurs pour éviter les pertes d'N par lessivage dans le cas d'excès d'eau et par volatilisation dans le cas d'un déficit hydrique qui limite l'absorption azotée.

Chapitre 7 : Discussion et perspectives

Ce chapitre a pour objectif de discuter les différents résultats du cadre d'analyse des compromis entre la production et l'efficacité. Il a été structuré en trois parties : i) Une première partie qui résume les principaux résultats obtenus dans la thèse en séparant les connaissances sur les facteurs limitants la production et l'efficacité, la démarche et les principaux résultats. ii) Une deuxième partie sur ce qu'il faudrait faire pour compléter le travail réalisé dans le cadre de cette thèse et iii) une troisième partie sur les perspectives de l'utilisation du cadre d'analyse pour analyser des scénarios dans le nexus alimentation-eau-azote à différentes échelles.

1. Résumé des principaux résultats

1.1. Les connaissances sur les facteurs limitant la production céréalière en Tunisie

Les céréales occupent une place centrale au sein des agricultures et de l'alimentation des pays méditerranéens depuis plusieurs millénaires. En Tunisie, le blé dur, le blé tendre et l'orge constituent les principales céréales qui contribuent à l'alimentation humaine et animale. Ces céréales occupent en moyenne le tiers de la superficie agricole utile (El Felah et al, 2015) soit une moyenne de 1,5 million d'ha durant les trois dernières décennies (1980-2013). En revanche, la production céréalière en Tunisie, étant surtout pluviale, elle est caractérisée par une variabilité interannuelle très importante et demeure en deçà des potentialités et des besoins du pays. Cette production ne suffit pas à compenser l'évolution de la demande avec l'accroissement de la population et le changement des modes alimentaires (Cheriet, 2013).

Par conséquent, la Tunisie est confrontée à un problème de dépendance extérieure qui s'accompagne de conséquences budgétaires. Entre 1980 et 2013, la production de blé dur représente en moyenne 60% de la production céréalière totale, suivie par l'orge (24%) et le blé tendre (13%). La variabilité de la production céréalière en Tunisie a été analysée à partir de la variabilité des rendements, des superficies semées et du ratio superficies semées sur superficies récoltées. La variabilité de la production en fonction de ces trois variables résulte aussi de fortes spécificités régionales. Dans les régions les plus pluvieuses situées au nord du pays, les emblavures sont stables d'une année sur l'autre et le rendement est la variable qui explique le mieux la production des trois céréales. A l'inverse, dans les régions du Centre et de Sud où dominent des climats de type semi-aride et aride, la production est plutôt expliquée par la variabilité des superficies semées et du ratio des superficies récoltées sur les superficies semées qui dépendent respectivement des pluies automnales et printanières.

Le blé dur constitue la principale céréale en Tunisie, en termes de production et de consommation. Cette céréale Caractérisée par sa qualité protéique des grains adaptée à la transformation en pâtes et en semoules (Sissons, 2008), cette céréale destinée est exclusivement à l'alimentation humaine. Dans les conditions méditerranéennes comme en Tunisie, la production du blé dur est généralement faible et variable en réponse à l'insuffisance et à l'irrégularité des pluies. Malgré les efforts entrepris en matière d'amélioration génétique, la production de blé dur reste très fluctuante et tributaire de plusieurs facteurs, essentiellement l'alimentation hydrique et azotée (Boussen et al, 2005). En Tunisie, l'accroissement des rendements de blé dur par l'irrigation de complément (Figure 16, Chapitre 1) et par l'accroissement des apports d'azote a été démontré (Figure 23, Chapitre 2). Néanmoins, l'évolution interannuelle des rendements de blé dur en Tunisie, a été associée à une variabilité de l'efficacité de l'N avec une tendance à la baisse (Figure 26.a, Chapitre 2). Quant à l'efficacité de l'eau, notamment dans les systèmes pluviaux, est très variable compte tenu de la variabilité de la pluviométrie interannuelle, en plus des déficits hydriques saisonniers qui pourraient régner, même durant une année pluvieuse.

1.2. Démarche d'analyse des relations efficacité et productivité

Afin d'analyser les relations entre le rendement et l'efficacité dans les systèmes de culture à base de blé dur et les possibilités de les augmenter conjointement, nous avons proposé un cadre conceptuel basé sur les concepts de facteur limitant (Passioura et Angus, 2010), d'écart de rendement (Van Ittersum et al, 2013) et de frontière d'éco-efficacité (Keating et al, 2010). Le point de départ de ce cadre est le concept de facteur limitant qui repose principalement sur la courbe enveloppe des rendements atteignables pour chaque niveau d'intrant (eau ou N) que nous avons appelé frontière d'efficacité. Cette courbe enveloppe décrit la variation du rendement lorsque seule la ressource considérée en abscisse (eau ou N) est limitante.

En adoptant l'approche de De Wit (1992), la frontière d'efficacité a été décomposée dans un diagramme à quatre quadrants en introduisant deux variables intermédiaires : l'absorption de la ressource (N absorbé, transpiration) et l'efficacité de l'utilisation de la ressource. Dans la partie droite du cadre, des frontières d'efficacités de la captation et de la conversion de la ressource ont été établis pour analyser les relations entre l'intrant et l'absorption de la ressource et entre l'absorption de la ressource et le rendement en grains, respectivement. Dans la partie gauche, des courbes représentant le compromis entre l'efficacité de l'utilisation de la ressource et les rendements en grains et l'efficacité de l'utilisation de la ressource et les

quantités d'intrants ont été établies. Ce cadre d'analyse a été utilisé pour tester l'hypothèse d'une influence de la diversification des successions culturales sur la frontière d'efficience.

Le cadre d'analyse a été testé et appliqué pour le cas de l'effet de la fertilisation azotée sur la production de blé dur en Méditerranée. Le cadre a d'abord été testé avec des données expérimentales, incluant la mesure de la quantité d'azote absorbé, obtenues à partir de données publiées sur des expérimentations réalisées à la station de l'ICARDA à Tel Hadya au nord de la Syrie (Harris, 1990 ; Ryan et al, 2008). Ces données couvrent des informations sur la biomasse en grains et en pailles et les teneurs en azote des grains et des pailles du blé dur soumis à quatre traitements azotés et cultivé dans sept types de rotations biannuelles. Le cadre a ensuite été appliqué sur des données collectées auprès des agriculteurs en Tunisie.

L'ensemble des données collectées est issu des enquêtes réalisées sur 537 situations agronomiques (c'est à dire la combinaison d'une parcelle de blé dur, une année et un précédent cultural) dans 4 régions qui fournissent une partie importante de la production céréalière (Jendouba, Siliana, Kairouan et le bassin versant de Lebna). Ces données couvrent essentiellement des informations relatives aux rendements (en grains et en paille), aux variables climatiques, aux apports azotés, aux précédents culturaux et aux différents éléments de l'itinéraire technique du blé dur. A partir de cette base, nous avons utilisé les données de 243 situations agronomiques, dont 115 sont à Fernena (Jendouba) et 128 au bassin versant de Lebna (Nabeul) pour analyser les compromis entre la production et l'efficience de l'azote pour la production de blé dur en pluvial. En revanche, n'ayant pas de mesure de la quantité d'azote absorbé sur chaque parcelle de blé dur, nous avons établi, avec d'autres données issues de la bibliographie et une expérimentation à Montpellier sur les variétés tunisiennes, un modèle permettant d'estimer l'azote absorbé à partir du rendement en grains.

Pour l'eau, nous avons proposé un cadre d'analyse du même type en introduisant la transpiration de la culture comme variable intermédiaire afin de séparer la captation et la conversion de la ressource. Dans une première étape, nous avons analysé les réponses du blé dur aux apports hydriques (pluie tombée pendant le cycle + irrigation lorsque elle est pratiquée) grâce à une courbe enveloppe qui représente les rendements atteignables lorsque seule l'eau est un facteur limitant (Passioura et Angus, 2010). Ensuite, nous avons défini les formes des frontières d'efficience de la captation et de la conversion de la ressource en nous basant sur l'équation de la courbe de réponse aux apports hydrique et sur la relation entre le rendement et la transpiration établie par Tanner et Sinclair (1983). Toutefois, par rapport à

l'azote absorbé, la transpiration est une variable difficile d'accès, et non disponible au niveau des parcelles des agriculteurs car elle représente le cumul sur le cycle d'un flux d'eau très variable d'un jour à l'autre. Cependant, cette variable pourrait être calculée en utilisant des modèles de simulation du bilan hydrique comme le modèle SSM-wheat (Soltani et al, 2013). Compte-tenu du manque de données pour paramétrer ce modèle et calculer la transpiration pour les parcelles d'agriculteurs, nous avons évalué ce modèle avec des mesures obtenues dans un essai variétal réalisé à Montpellier avec des variétés Tunisiennes de blé dur.

Après avoir étudié l'efficacité de l'azote et de l'eau pour la production de blé dur en Tunisie, la question de l'interaction entre ces deux ressources a été traitée afin d'identifier son effet sur les rendements de blé dur. Pour cette analyse, nous avons utilisé deux méthodes. La première se base principalement sur l'analyse des courbes enveloppes des réponses à un facteur en fonction du deuxième facteur. La deuxième méthode consiste à analyser la distribution des écarts de rendement permis par un facteur (par exemple l'azote) en fonction de l'autre facteur (l'eau).

1.3. Résultats du cadre d'analyse de l'efficacité de l'azote et de l'eau

Notre travail a fait ressortir trois principaux résultats :

- L'effet du précédent cultural sur la captation et la conversion de la ressource par le blé dur

La partie droite du cadre d'analyse des compromis entre l'efficacité et la production appelée « Analyse » de l'agrosystème a montré que le potentiel d'absorption azotée est significativement plus élevé en système de rotation, particulièrement après une légumineuse comme la lentille et la vesce, qu'avec un blé en monoculture de céréales. Ce résultat a été montré aussi bien avec les données expérimentales de l'ICARDA (Figure 36, Chapitre 4) qu'avec les données collectées auprès des agriculteurs dans deux régions Tunisiennes (Figure 40, Chapitre 5), sur le blé dur en pluvial. L'introduction des légumineuses dans les systèmes céréaliers pourrait avoir un effet fertilisant plus élevé qu'en monoculture, en raison de l'enrichissement du sol par le processus de fixation symbiotique d'azote (Voisin et al, 2015). Les légumineuses pourraient également améliorer la structure du sol, en augmentant la stabilité des agrégats du sol et sa porosité (Masri et Ryan, 2006) favorisant ainsi la minéralisation de l'azote du sol et l'absorption des plantes. L'introduction des légumineuses permettraient aussi de rompre les cycles des pathogènes et de limiter le risque d'apparition d'adventices, de maladies et de ravageurs. Toutefois, notre méthode d'estimation de l'N

absorbée au niveau des parcelles d'agriculteurs Tunisiens ne permet pas de discuter l'effet du précédent cultural sur l'efficacité de la conversion de l'azote absorbé. Cependant, les données expérimentales de l'ICARDA ont montré que l'effet du précédent cultural sur la conversion de l'azote absorbé en grains n'est pas aussi important que sur la captation de la ressource.

- L'effet du précédent cultural sur les écarts d'absorption d'azote

L'introduction des cultures diversifiées, particulièrement les légumineuses, dans les systèmes céréaliers à base de blé dur a permis de déplacer la frontière d'efficacité de la captation d'azote à un niveau plus élevé, mais elle n'a pas permis une augmentation de l'absorption azotée aussi forte dans la plupart des parcelles. En effet, nos résultats obtenus au niveau des parcelles d'agriculteurs en Tunisie ont montré une grande variabilité des niveaux d'azote absorbé par la culture de blé dur, ce qui a entraîné une variabilité supplémentaire de l'efficacité de la captation de la ressource. Cette variabilité pourrait être expliquée par la gestion des apports azotés tout au long du cycle de la culture. D'autres facteurs biotiques et abiotiques pourraient expliquer la variabilité des écarts d'absorption d'azote, principalement le stress hydrique dans des conditions pluviales ou la présence des maladies et des mauvaises herbes.

- L'effet du précédent cultural sur le compromis entre les rendements et l'efficacité de l'intrant

La partie gauche du cadre d'analyse appelée « conception », parce qu'elle permet de réfléchir à des stratégies d'amélioration des systèmes de culture, a montré que l'introduction de cultures diversifiées, particulièrement des légumineuses, dans un système céréalier à base de blé dur a permis d'atteindre une nouvelle courbe enveloppe permettant une augmentation simultanée des rendements et de l'efficacité de l'utilisation de l'N. Par conséquent, un nouveau compromis entre la production et l'efficacité de la ressource pourrait être créé, surtout si le niveau des apports azotés doit être baissé pour des raisons environnementales.

En ce qui concerne l'eau, l'illustration de la relation entre le rendement en grains et les apports hydriques a montré une très grande variabilité des réponses du blé dur à l'eau dans les trois régions de céréaliculture irriguée considérées en Tunisie (périmètres irrigués des régions de Jendouba, Siliana et Kairouan). La variabilité de l'efficacité de l'utilisation de l'eau a été expliquée dans une première étape par l'effet du précédent cultural. En effet, dans les blés conduits en irrigué et en monoculture le rendement n'a pas dépassé 4,5 t/ha. Alors que les rotations avec des cultures diversifiées (blé sur cultures maraîchères, légumineuses et

betterave sucrière) ont permis de créer un nouveau potentiel de rendement à 6,6 t/ha. La variabilité des réponses de blé dur à l'eau pourrait également être expliquée par la présence d'autres facteurs biotiques et abiotiques. Les interactions eau/azote pourraient être considérées parmi les principaux facteurs de production qui doivent être prises en compte par les agriculteurs pour éviter les pertes d'N par lessivage dans le cas d'excès d'eau et par volatilisation dans le cas d'un déficit hydrique qui limite l'absorption azotée et la minéralisation de l'azote du sol et des résidus.

2. Travaux complémentaires à réaliser

2.1. Collecte de données

La méthodologie adoptée dans cette thèse qui se base sur le cadre d'analyse des efficacités de captation, de conversion et de l'utilisation de la ressource et qui mobilise des données d'enquêtes, expérimentales et de modélisation, présente des limites. En effet, ce cadre d'analyse se base principalement sur des courbes enveloppes appelées des frontières d'efficacité, qui représentent les performances atteignables (rendement, absorption de la ressource, efficacité) à chaque niveau d'intrant. La limite majeure de cette approche de frontière d'efficacité est la non-prise en compte de tous les facteurs qui peuvent influencer sur la production. En absence de quelques données importantes pour la caractérisation des situations agronomiques des parcelles du blé dur, l'analyse des compromis entre la production de blé dur et l'efficacité de l'eau et de l'azote pour la production de blé dur reste incomplète.

2.1.1. Azote

Apports d'engrais azoté pour la production du blé dur en Tunisie

Les données sur les quantités d'engrais azotés n'étaient disponible qu'à l'échelle nationale et pour toutes les céréales confondues. Pour analyser l'efficacité de l'azote pour la production de blé dur en Tunisie, nous avons calculé ces apports azotés en se basant sur des hypothèses (1.1, Chapitre 2).

L'azote absorbé au niveau des parcelles d'agriculteurs

L'azote absorbé est la première variable intermédiaire qui a été introduite pour caractériser les processus de captation de la ressource du sol et de sa conversion en grains. Pour obtenir cette variable au niveau des parcelles d'agriculteurs, il est nécessaire d'avoir l'information sur la biomasse en grains et en pailles et sur les teneurs en azote des grains et des pailles, après la récolte. Toutefois, la non-disponibilité de l'information sur les teneurs en azote des grains et

des pailles et d'une information précise sur la biomasse des pailles (en balles), nous avons utilisé un modèle permettant d'estimer cette variable. Ce modèle permet de calculer l'azote absorbé en fonction des rendements en grains, en se basant sur deux paramètres calculés à partir des données publiées : la teneur en azote des grains (% Ng) et l'indice de récolte en azote (NHI). Ces paramètres ont été considérés comme des constantes et ils étaient appliqués pour toutes les situations agronomiques, alors qu'en réalité, ces paramètres peuvent varier en fonction du précédent cultural, des apports azotés (Ryan et al, 2008), du génotype (Desai et Bhatia, 1978 ; Ruisi et al, 2015)...etc. Par conséquent, les valeurs calculées de l'azote absorbé nous ont permis d'analyser l'efficacité de la captation de la ressource en fonction des rotations, mais elles n'ont pas permis de discuter la conversion de la ressource.

Azote disponible dans le sol

La connaissance de l'azote disponible dans le sol à partir de la date de semis et tout au long du cycle de la culture, au niveau des parcelles expérimentales de l'ICARDA et des parcelles d'agriculteurs, aurait été pertinente pour expliquer les processus de la captation de la ressource en fonction du type de rotation. Nous aurions pu ainsi enrichir la partie droite du quadrant en introduisant entre les apports et l'azote absorbée une autre variable (azote disponible dans le sol) comme le proposent Porter et Christensen (2013). Outre la captation et la conversion de la ressource, ce cadre d'analyse permet aussi d'évaluer les pertes d'azote dans l'environnement et la fourniture d'azote par minéralisation de la matière organique et les résidus de récolte.

Les reliquats d'azote minéral

Des mesures des reliquats d'azote au semis sont également nécessaires pour commenter l'effet du précédent cultural sur la captation de la ressource azotée. En effet, les reliquats d'azote minéral pourraient être importants après des cultures maraîchères sur-fertilisées.

2.1.2. Eau

La pluviométrie mensuelle et les doses d'irrigation à l'échelle nationale

Pour analyser la variabilité interannuelle de l'efficacité de l'eau pour la production de blé dur en Tunisie, nous avons eu besoin de données sur la pluviométrie mensuelle afin de calculer les apports hydriques du semis à la récolte et sur les doses d'irrigation apportées chaque année au blé dur. Toutefois, les données sur les irrigations ne sont pas disponibles et pour la pluviométrie mensuelle, les données collectées sont uniquement sur une période de 9 ans

(2003-2012). Par conséquent, on a calculé l'efficience de l'eau uniquement pour le blé dur conduit en pluvial sur une période courte qui ne permet pas de visualiser la tendance générale de cette efficience.

La transpiration et d'autres données manquantes pour paramétrer le modèle de bilan hydrique

Dans l'objectif d'établir un cadre d'analyse de l'efficience de l'eau, nous avons proposé d'introduire dans la relation entre les apports hydriques et les rendements en grains, la transpiration comme une variable intermédiaire pour séparer la captation et la conversion de la ressource. En raison de la non-disponibilité de données sur la transpiration, nous avons proposé d'utiliser un modèle permettant de l'estimer. Pour l'utiliser et l'appliquer à toutes les situations agronomiques, nous avons besoin de données précises sur le climat (VPD, pluviométrie, températures maximales et minimales, rayonnement...), le sol (réserve utile) et la plante (Les températures cardinales pour le développement, les dates des différents stades de développement (levée, épiaison, floraison et maturité)).

2.1.3. Autres facteurs limitants

Caractérisation physico-chimique des sols au niveau des parcelles d'agriculteurs

L'analyse de l'efficience de l'utilisation de l'eau et de l'azote et de leurs relations avec la production de blé dur nécessiterait des données plus précises (à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation agricole) sur les caractéristiques du sol : les teneurs en matière organique, les textures et les profondeurs des sols, la réserve utile, l'humidité du sol au semis...etc.

Données sur les précédents culturels pour l'ensemble des parcelles d'agriculteurs

Dans l'analyse de l'efficience de l'eau (Chapitre 6), nous avons analysé les courbes de réponses aux apports hydriques suivant l'approche de Passioura et Angus (2010), en essayant d'identifier une nouvelle frontière d'efficience (Keating et al, 2010) en fonction du précédent culturel. Ces courbes enveloppes ont été établies seulement pour les parcelles conduites en irrigué pour avoir une large gamme d'apports hydrique (sur l'axe des abscisses). Toutefois, comme le nombre de données sur les parcelles irriguées où les agriculteurs font blé sur blé est très limité par rapport à celui des parcelles où ils font des rotations diversifiées, il était difficile de comparer les frontières d'efficience pour les deux systèmes de culture avec un test statistique. En outre, dans la majorité des parcelles irriguées, le blé dur est cultivé après une culture maraîchère, en raison de la proximité des périmètres irrigués aux sources d'eau (barrages, lac collinaires, ...). En raison du nombre limité des parcelles ayant d'autres

précédents culturels (légumineuses, betterave sucrière, ...), il est difficile d'identifier des frontières d'efficacité en fonction des précédents culturels, comme pour l'azote.

Données sur les éléments du système techniques et l'état sanitaire du sol et des cultures

La répartition des apports hydriques et azotés pourrait être considérée comme un facteur principal pour expliquer la variabilité des rendements de blé dur, des efficacités de l'eau et de l'azote et des écarts d'absorption d'azote (Van Ittersum et al, 2013). Par exemple, un apport azoté tardif pourrait affecter l'absorption azotée et la teneur en protéines des grains. L'information sur la présence de maladies ou de mauvaises herbes et sur les interventions qui ont été effectuées pour la protection phytosanitaire est aussi nécessaire pour identifier les performances réduites par ces facteurs.

2.2. Cadre d'analyse des compromis entre la production et l'efficacité de l'eau

Suivant la même démarche pour l'azote, nous avons proposé dans le chapitre 6, la démarche pour établir un cadre d'analyse des compromis entre la production et l'efficacité de l'eau. En revanche, ce cadre n'a pas été appliqué sur des données concrètes. Pour finaliser la démarche, nous devons effectuer les simulations du modèle SSM-wheat afin de calculer la transpiration pour toutes les parcelles de blé dur. Ensuite, comme pour l'azote, les nuages des points des relations entre les apports hydriques et la transpiration (captation de la ressource) et entre la transpiration et les rendements en grains (conversion de la ressource) permettront de tracer des frontières d'efficacité en fonction du type de rotation.

2.3. Analyse de l'effet de l'interaction entre l'eau et l'azote sur la production et l'efficacité de ces deux ressources

L'interaction a été analysée en se basant sur les courbes enveloppes des réponses à un facteur en fonction du deuxième facteur et sur la distribution des écarts de rendement permis par un facteur en fonction de l'autre facteur. Ces méthodes permettent d'analyser l'interaction eau/N en terme quantitatif. En revanche, l'analyse de l'interaction entre ces deux ressources doit tenir compte aussi de la distribution des apports hydriques et azotés tout au long du cycle de la culture. Pour ce faire, on peut utiliser des modèles intégrant la dynamique de croissance de la plante et de prélèvement des ressources au cours du cycle du blé dur afin de simuler l'augmentation et la diminution des rendements en changeant les dates et les quantités des apports hydriques et azotés.

3. Leviers d'action pour améliorer la production du blé dur et l'efficacité de l'azote et de l'eau

Les résultats du cadre d'analyse, permettent d'identifier un ensemble de leviers d'action pour améliorer simultanément la production alimentaire et l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'azote dans un système céréalier à base de blé dur, en méditerranée. Pour augmenter la production du blé dur en Tunisie, on peut envisager d'augmenter les superficies semées, d'améliorer le ratio des superficies semées sur superficies récoltées ou d'augmenter la productivité des terres agricoles (Eq.1). Cependant, les céréales occupent déjà une grande partie des superficies cultivables dans le pays (un tiers), dont la moitié est destinée au blé dur. Ces emblavures, ainsi que le ratio des superficies récoltées sur superficies semées sont largement dépendants des conditions climatiques, notamment la pluviométrie. Par conséquent, il est plus pertinent de chercher des solutions permettant l'accroissement des rendements du blé dur.

$$(Eq. 1) \quad \text{Production} \equiv \text{Rendement} \times \text{Superficies semées} \times \frac{\text{Superficies récoltées}}{\text{Superficies semées}}$$

$$\text{Production} \equiv \text{Rendement} \times \text{Superficies récoltées}$$

Dans cette étude, nous avons proposé de tester l'effet du changement de la structure du système de culture sur le compromis entre la production et l'efficacité de l'intrant (principalement l'azote). En raison de la disponibilité des données, nous avons choisi les rotations en tant que diversification temporelle d'un système céréalier. La partie gauche du cadre d'analyse a fourni des courbes enveloppes pour chaque système de culture, qui représentent les compromis entre chaque niveau d'apport azoté et l'efficacité de son utilisation et entre un niveau objectif de rendement et d'efficacité d'utilisation d'N. L'introduction de la quantité d'intrant permet une analyse stratégique des scénarios dans le nexus superficie-intrants-production alimentaire (Ringler et al, 2013) à partir de l'identité (Eq.2) c'est à dire la décomposition d'une performance (ici la production alimentaire) en composants de base qui reste valable à différentes échelles.

$$(Eq. 2) \quad \text{Production} \equiv \text{Superficie récoltée} \times \frac{\text{Intrant}}{\text{Superficie récoltée}} \times \frac{\text{Production}}{\text{Intrant}}$$

Les courbes enveloppes de la partie gauche du cadre indiquent que le dernier terme de l'identité (Eq.2) qui représente l'efficacité de l'intrant pour la production de blé dur est dépendant de la quantité d'intrant (Figure 54.b) et de l'objectif de rendement (Figure 54.a).

Ceci permet d'utiliser l'identité comme une équation en remplaçant le dernier terme par l'équation de la figure 54.a. L'objectif n'est pas d'en faire un modèle prédictif du rendement mais d'utiliser cette équation comme un « objet frontière » pour discuter avec les agriculteurs et les acteurs régionaux de scénarios bâtis sur des données collectées dans les parcelles des agriculteurs. A titre d'illustration de la démarche nous donnons ci-dessous un exemple basé sur le rendement permis par l'azote, pour lequel nous avons des données plus solides, c'est à dire en considérant que les autres facteurs limitants pourraient être levés.

L'analyse des compromis entre l'efficacité de l'utilisation d'azote et les rendements/les apports azotés en fonction du système de culture a montré une large gamme d'efficacités qui varie de 0 à 100 kg de grains par kg d'azote apporté. Cette variabilité dépend des deux composantes du ratio efficacité de l'utilisation d'N : le rendement et l'apport azoté et du précédent cultural. Les efficacités les plus élevées ont été obtenues avec les apports azotés les plus faibles conduisant à une diminution des rendements. En revanche, l'augmentation du rendement de blé dur dans la région méditerranéenne et particulièrement en Tunisie est essentielle pour augmenter la production à l'échelle nationale et répondre aux besoins croissants de la population. Par conséquent, on est dans une situation de compromis entre l'efficacité de l'utilisation d'azote et la production céréalière, si les superficies consacrées à ces cultures sont maintenues constantes, comme dans le nord du pays. Cependant, en passant d'un blé en monoculture céréalière (c'est à dire semé derrière un blé tendre, un blé dur ou une orge) à un blé en rotation avec des légumineuses, tout en restant en pluvial, il est possible de créer un nouveau compromis permettant l'augmentation simultanée de la production et de l'efficacité de l'utilisation d'azote. Ceci rend possible de réduire les apports azotés pour des fins environnementales et économiques tout en maintenant un bon niveau de production. Les céréales étant la base de l'alimentation dans la région il faut cependant que ce gain d'efficacité soit suffisant pour compenser la perte de surface en blé dur liée à l'introduction des légumineuses dans la rotation, ce que suggère la figure 54.a.

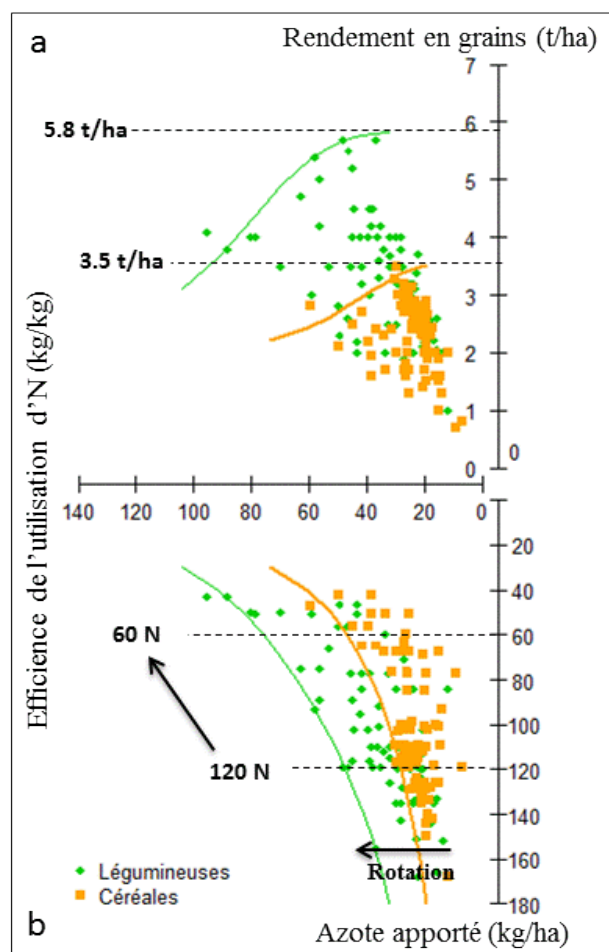


Figure 54. Cadre d'analyse permettant d'analyser des scénarios et proposer des voies d'amélioration des compromis entre l'efficacité de l'intrant et les rendements (a)/les intrants (b), en se basant sur les courbes enveloppes en fonction des rotations : Blé dur en pluvial après une céréale, Blé dur en pluvial après une légumineuses

Si on applique l'identité (Eq.2) générée avec les données d'agriculteurs sur la région de Jendouba, on peut calculer le potentiel de production de cette région céréalière dont la superficie de blé dur en pluvial est de 60 000 ha (Figure 55). Pour un blé dur en monoculture, le potentiel de production obtenu avec 7200 tonnes d'azote (120 kg/ha) est de 202 000 tonnes par an, avec une efficacité de 28 kg de grains/kg d'N (Point A, Figure 55). Si on introduit une légumineuse tous les trois ans (légumineuses, blé, blé), la quantité d'intrant azoté sera réduite d'un tiers car elle n'est pas fertilisée. Les superficies allouées au blé dur seront aussi réduites d'un tiers mais l'efficacité de l'azote sur ces cultures augmentera de 24 % par rapport à la situation initiale. Cependant, le nouveau potentiel de production calculé en appliquant ces 3 termes de l'identité diminuera par rapport à la situation initiale jusqu'à 180 000 T (point B). Si on ajoute une légumineuse alimentaire, ici on prend le cas de la lentille (rendement : 1,8 t/ha

(Beck et al, 1991)), qui peut produire de la nourriture sans apports azotés, on peut à la fois augmenter la production alimentaire (Point C) et réduire la quantité d'azote utilisée dans la région.

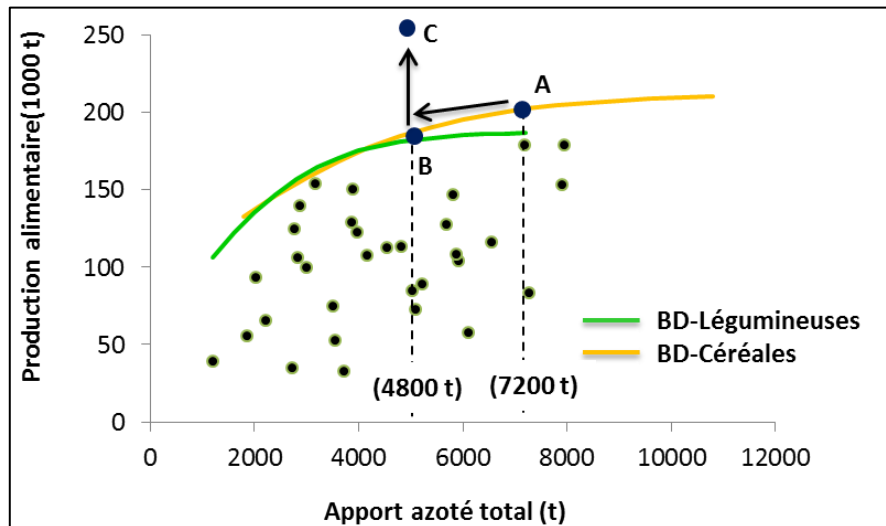


Figure 55. Relations entre les apports azotés et le potentiel de production annuel moyen sur trois ans pour un blé dur en monoculture (blé-blé-blé) et un blé dur dans une rotation triennale avec une légumineuse (légumineuse-blé-blé) et variabilité de la production de blé dur et des apports azotés entre 1981 et 2012 dans la région de Jendouba

Cette étude permet de construire un ensemble de leviers d'action pour raisonner avec des décideurs des marges de manœuvres qu'on a précisément dans le nexus superficie-intrants-production alimentaire, pour augmenter la production alimentaire et l'efficacité des intrants dans des conditions méditerranéennes. En revanche, dans cette étude, on s'est focalisé sur une région où seulement le rendement varie, alors que dans d'autres régions moins pluvieuses comme les régions du centre (exemple Kairouan), la production est dépendante aussi des superficies semées et du ratio des superficies récoltées sur superficies semées, d'où l'intérêt d'analyser aussi des scénarios en prenant en compte ces 2 facteurs comme indiqué au chapitre 1.

Références bibliographiques

- Abad, A., Lloveras, J., Michelena, A., 2004. Nitrogen fertilization and foliar urea effects on durum wheat yield and quality and on residual soil nitrate in irrigated Mediterranean conditions. *Field Crops Research* (87), p 257-269.
- Abdelkefi, B., Boughanmi, H., 1995. L'approche de la matrice d'analyse des politiques appliquée à l'étude du secteur sucrier en Tunisie. *Tropicultura* 2, 51-58.
- ALMIRA, <https://www.almira-project.org/>
- Albrizio, R., Todorovic, M., Matic, T., Stellacci, A.M., 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Research* 115, 179–190.
- Amigues, J.P., Debaeke, B.I., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., Thomas, A., 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72.
- Ammar, K., Gharbi, M.S., Deghais, M., 2011. Wheat in Tunisia. In *The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding, Volume 2*. Bonjean, A., Angus, W., Van Ginkel, M., (Editors). Lavoisier. 1201.
- Anbessa, Y., Juskiw, P., 2012. Review : Strategies to increase nitrogen use efficiency of spring barley. *ISRN Agronomy* 2012, 1–8.
- Anderson, W. K., Impiglia, A., 2002. Management of dryland wheat. Bread wheat improvement and production. FAO, Rome, 407-432.
- Annabi, M., Bahri, H., Béhi, O., Sfayhi, D., Cheikh Mhamed, H., 2013. La fertilisation azotée du blé en Tunisie: évolution et principaux déterminants. *Tropicultura*, 314, 247-252.
- Araus, J. L., Bort, J., Steduto, P., Villegas, D., Royo, C., 2003. Breeding cereals for Mediterranean conditions: ecophysiological clues for biotechnology application. *Annals of Applied Biology*, 1422, 129-141.
- Araus, J. L., Slafer, G. A., Reynolds, M. P., Royo, C., 2002. Plant Breeding and Drought in C3 Cereals: What Should We Breed For? *Annals of Botany*, 897, 925-940.
- Ayadi, S., Karmous, C., Hammami, Z., Trifa, Y., Rezgui, S., 2014. Variation of durum wheat yield and nitrogen use efficiency under Mediterranean rainfed environment. *IJACS Journal* 7 (10), 693–699.
- Bachta, M.S., 2011. Les notes d'analyse du CIHEAM N ° 6 4 – Décembre 2 0 1 1 La céréaliculture en Tunisie Une politique de régulation à repenser.
- Beck, D.P., Wery, J., Saxena, M.C., Ayadi, A., 1991. Dinitrogen Fixation and Nitrogen Balance in Cool-Season Food Legumes. *Agronomy Journal* 83, 334–341.
- Ben Selem, M., Daaloul, A., Ayadi, A., 1995. Le blé dur en Tunisie, In: Di Fonzo, N., Kaan, F., Nachit, M., (editors). *Durum wheat quality in the Mediterranean region. Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens* 22, 81-91.

- Ben Selem, M., Degais, M. Stabilité de la production en grains d'une collection de blé tendre. Des modèles biologiques à l'amélioration des plantes, 480-490.
- Ben Naceur, M., El Felah, M., El Gharbi, M.S., Kaabia, M., Karrou, M., Mellouli, H.J., Nahdi, H., Slafer, G.A., 2007. Efficience de l'utilisation de l'eau chez le blé et l'orge sous différents régimes hydriques et de fertilisation azotée dans des conditions subhumides de Tunisie. Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches 56 Vol. I : 179-189
- Bogard, M., Allard, V., Brancourt-hulmel, M., Heumez, E., Machet, J., 2010. Deviation from the grain protein concentration – grain yield negative relationship is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat. *Journal of Experimental Botany* (2010), 1–10.
- Bortoli, L., Gounot, M., Jacquinet, J.C., 1969. Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie septentrionale, *Ann. I.N.R.A.Tunisie* 42, 1–235.
- Boussen, H., Mellek-Maalej, E., Asr, N.Z., Ben Mechlia, N., 2005. Efficience d'utilisation de l'eau et de l'azote chez le blé dur : Etude comparative de deux variétés à haut potentiel de production. In: International conference on: water, land and food security in arid and semi-arid regions, 1–11.
- Bouajila, K., Ben Jeddi, F., Sanaa, M., 2013. Valorisation des terres en pente par le sulla du nord (*Hedysarum Coronarium* L.) en condition du semis direct et conventionnel. *Journal of Agriculture and Environment for International Development – JAEID*. 2013, 107 (1): 33 – 43.
- Broberg, O., Andersen, V., Seim, R., 2011. Participatory ergonomics in design processes: The role of boundary objects. *Applied Ergonomics* 42, 464-472.
- Carberry, P.S., Liang, W., Twomlow, S., Holzworth, D.P., Dimes, J.P., McClelland, T., Huth, N.I., Chen, F., Hochman, Z., Keating, B. a., 2013. Scope for improved eco-efficiency varies among diverse cropping systems. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 8381–6.
- Cassman, K.G., 1999. Ecological intensification of cereal production systems : Yield potential , soil quality , and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96, 5952–5959.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D., 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO* 31, 132–140.
- Chekali, S., Gargouri, S., Rezgui, M., Paulitz, T., Nasraoui, B., 2016. Impacts of previous crops on Fusarium foot and root rot, and on yields of durum wheat in North West Tunisia. *Phytopathologia Mediterranea*, 552, 253-261.
- Cheriet, F., 2013. Prospectives céréalières en Méditerranée Scénarios à l'horizon 2030. *Économie rurale Agricultures, alimentations, territoires*, 335.
- CIHEAM., 2012. « Mediterra : La diète méditerranéenne pour un développement régional durable », Rapport Annuel, CIHEAM, Montpellier, 525 p.
- Condon, A. G., Richards, R. A., Rebetzke, G. J., Farquhar, G. D., 2004. Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 55407, 2447-2460.
- Cossani, C. M., Slafer, G. A., Savin, R., 2012. Nitrogen and water use efficiencies of wheat and barley under a Mediterranean environment in Catalonia. *Field Crops Research*, 128, 109-118.

- Cooper, P.J.M., Gregory, P.J., Tully, D., Harris, H.C., 1987. Improving water-use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa. *Exp. Agric.* 23, 113–158.
- Cox, M., Reisenauer, W., 1973. Growth and ion uptake by wheat supplied nitrogen as nitrate , or ammonium, or both. *Plant Soil* 380, 363–380.
- CPP., 2013. Cadre de programmation pays, FAO- Tunisie 2013-2015
- De Giorgio, D., Montemurro, F., 2006. Nutritional status and nitrogen utilization efficiency of durum wheat in a semiarid Mediterranean environment. *Agricoltura Mediterranea* 160, 91-101.
- Delmotte, S., Tittonell, P., Mouret, J.C., Hammond, R., Lopez-Ridaura, S., 2011. On farm assessment of rice yield variability and productivity gaps between organic and conventional cropping systems under Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy* 35, 223-236.
- Dhehibi, B., Bahri, H., Annabi, M., 2012. Input and output technical efficiency and total factor productivity of wheat production in Tunisia. *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, 71, 70-87.
- Delogu, G., Cattivelli, L., Pecchioni, N., De Falcis D., Maggiore, T., Stanca, A.M., 1998. Uptake and agronomic e Y ciency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy* 9, 11–20.
- Desai, R.M., Bhatia, C.R., 1978. Nitrogen uptake and nitrogen harvest index in durum wheat cultivars varying in their grain protein concentration. *Euphytica* 27, 561–566.
- De Wit, C.T., 1992. Resource use efficiency in agriculture. *Agricultural Systems* 40, 125–151.
- Dobermann, A., De Wit C.T., Buresh R., 2008. Ecological intensification of irrigated rice systems in Asia. In: *Proc of 5th International Crop Science Congress*, Jeju, Korea. CD.
- Ehdaie, B., Waines, J.G., 2001. Sowing date and nitrogen rate effects on dry matter and nitrogen partitioning in bread and durum wheat. *Field Crops Research* 73, 47–61.
- El Felah, M., Gharbi, M., Ghanem, H., Elloumi, M., 2015. Les céréales en Tunisie entre mythe et réalité. *ANNALES DE L'INRATT*, 882, 1-17.
- El Felah., M., Gharbi, M. S., 2014. Les céréales en Tunisie : Historique, contraintes de développement et perspectives. *Journée Nationale sur la valorisation des résultats de la Recherche dans le domaine des Grandes Cultures*, 1–7.
- Fermont, A.M., Van Astena, P.J.A., Tittonell, P., Van Wijk, K.E., 2009. Closing the cassava yield gap: An analysis from smallholder farms in East Africa. *Field Crops Research* 112, 24–36.
- FAOSTAT., 2014. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Fustec, J., Lesuffleur, F., Mahieu, S., Cliquet, J.B., 2010. Nitrogen rhizodeposition of legumes–A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 57–66.
- Gaba, S., Lescourret, F., Boudsocq, S., Enjalbert, J., Hinsinger, P., Journet, E.P., Navas, M.L., Wery, J., Louarn, G., Malézieux, E., Pelzer, E., Prudent, M., Ozier-Lafontaine, H., 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 607-623.

- Garabet, S., Ryan, J., Wood, M., 1998. Nitrogen and water effects on wheat yield in a Mediterranean-type climate . II . Fertilizer-use efficiency with labelled nitrogen. *Field Crops Research* 58, 213–221
- Giller, K.E., Chalk, P., Dobermann, a., Hammond, L., Heffer, P., Ladha, J.K., Nyamudeza, P., Maene, L., Ssali, H., Freney, J., Mosier, a. R., Syers, K.J., Freney, J.R., 2004. Emerging technologies to increase the efficiency of use of fertilizer nitrogen. Island Press Washington, 35–51.
- Guarda, G., Padovan, S., Delogu, G. 2004. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *European Journal of Agronomy*, 212, 181-192.
- Harris, H.C., 1990. Productivity of crop rotations. In: Farm Resource Management Program. Annual Report for 1989. ICARDA, Aleppo, Syria, 137–157.
- Hochman, Z., Prestwidge, D., Carberry, P.S., 2014. Crop sequences in Australia’s northern grain zone are less agronomically efficient than implied by the sum of their parts. *Agricultural Systems* 129, 124–132.
- Hobbs, P.R., Sayre, K., Gupta, R., 2008. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions Royal Society B* 363: 543-555.
- Karrou, M., 2001. Stratégie d'amélioration de l'efficience de l'utilisation d'azote. *H.T.E.N* 118, 93–96.
- Kambou, D., Xanthoulis, D., Ouattara, K., Degré, A., 2014. Concepts d’efficience et de productivité de l’eau (synthèse bibliographique), 18(1).
- Keating, B. A., Carberry, P.S., Bindraban, P.S., Asseng, S., Meinke, H., Dixon, J., 2010. Eco-efficient Agriculture: Concepts, Challenges, and Opportunities. *Crop Science* 50, 109–119.
- Khila, S. B., Douh, B., Mguidiche, A., Boujelben, A., 2015. Effets de la contrainte hydrique et des changements climatiques sur la productivité du blé dur en conditions climatiques semi arides de Tunisie. *LARHYSS Journal* ISSN 1112-3680, 23, 69-85.
- Latiri-Souki, K., Nortcliff, S., Lawlor, D.W., 1998. Nitrogen fertilizer can increase dry matter, grain production and radiation and water use efficiencies for durum wheat under semi-arid conditions. *European Journal of Agronomy* 9, 21–34.
- Latiri, K., 2000. Conditions climatiques, production et fertilisation azotée. Durum Wheat Improvement in the Mediterranean Region: New challenges. *Options Méditerranéennes, Série A*, 40, 591-593.
- Latiri, K., Lhomme, J. P., Annabi, M., Setter, T. L., 2010. Wheat production in Tunisia: Progress, inter-annual variability and relation to rainfall. *European Journal of Agronomy*, 331, 33-42.
- Le Mouël, C., Forslund, F., Marty, P., Manceron, S., Marajo-Petitzon, E., Caillaud, M.A., Schmitt, B., 2015. Le système agricole et alimentaire de la région Afrique du Nord – Moyen-Orient A l’horizon 2050 : Projections De Tendance Et Analyse De Sensibilité.
- Lebdi, F., 2009. Contraintes de l'agriculture irriguée aux opportunités du marché, cas de la Tunisie, Les notes d’analyse du CIHEAM. N°51, 83p

- López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., Redondo, R., 2005. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crops Research* 94, 86–97.
- López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., 2001. Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean conditions: Effect of tillage, crop rotation and N fertilization. *Field Crops Research* 71, 31–46.
- Masri, Z., Ryan, J., 2006. Soil Organic Matter and Related Physical Properties in a Mediterranean Wheat- based Rotation Trial Soil organic matter and related physical properties in a Mediterranean wheat-based rotation trial. *Soil and Tillage Research* 87, 146–154.
- Mailhol, J. C., Zaïri, A., Slatni, A., Ben Nouma, B., El Amani, H., 2004. Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia. *Agricultural Water Management*, 701, 19-37.
- Melki, M., Samaali, S., Mechri, M., Saidi, W., 2015. Étude qualitative et quantitative de la production du blé dur (*Triticum durum* Desf .) conduit sous différentes modalités de fractionnement de nitrate d'ammonium. *Journal of New Sciences* 20, 810–817.
- Mitscherlich, E. A., 1909. Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtschaftliches Jahrbuch der Schweiz* 38, 537–552.
- Montemurro, F., Maiorana, M., 2014. Cropping systems , tillage and fertilization strategies for durum wheat performance and soil properties. *International Journal of Plant Production* 8, 51–76.
- Mouelhi, B., Arfaoui, S., Boussalmi, A., Ben Jeddi, F., 2016. Effet du mode de semis et de la rotation culturale sur les paramètres de croissance et les composantes de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf) variété « Karim ». *Journal of new sciences* 28(11), 1638–1648.
- Murphy, D.V., Sparling, G.P., Fillery, I.R.P., 1998a. Seasonal fluctuations in gross N mineralisation, ammonium consumption, and microbial biomass in a Western Australian soil under different land uses. *Australian Journal of Agricultural Research* 49, 523–536.
- Nazco, R., Peña, R. J., Ammar, K., Villegas, D., Crossa, J., Moragues, M., Royo, C., 2014. Variability in glutenin subunit composition of Mediterranean durum wheat germplasm and its relationship with gluten strength. *The Journal of agricultural science*, 15203, 379-393.
- Neuchâtel., 2014. Rapport de méthodes Echantillonnage boule de neige : La méthode de sondage déterminé par les répondants. Office fédéral de la statistique (OFS).
- ONAGRI., 2014, <http://www.onagri.nat.tn/>
- ORE OMERE, <http://www.obs-omere.org/>
- Ottman, MJ., Doerge, T.A., Martin, E.C., 2000. Durum grain quality as affected by nitrogen fertilization near anthesis and irrigation during grain fill. *Agronomy Journal* 92, 1035–1041.
- Pala, M., Ryan, J., Zhang, H., Singh, M., Harris, H.C., 2007. Water-use efficiency of wheat-based rotation systems in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 93, 136–144.
- Passioura, J. B., Angus, J. F., 2010. Chapter 2 - Improving Productivity of Crops in Water-Limited Environments. In L. S. Donald Ed., *Advances in Agronomy Vol. Volume 106*, pp. 37-75: Academic Press.

- Porter, J.R., Christensen, S., 2013. Deconstructing crop processes and models via identities. *Plant, Cell Environment* 36, 1919–1925.
- Quemada, M., Gabriel, J.L., 2016. Approaches for increasing nitrogen and water use efficiency simultaneously. *Global Food Security* 9, 29–35.
- Rahman, M.M., Islam, A.M., Azirun, S.M., Boyce, A.N., 2014. Tropical legume crop rotation and nitrogen fertilizer effects on agronomic and nitrogen efficiency of rice. *The Scientific World Journal* (2014), 1-11.
- Rastoin, J. L., Benabderrazik, E. H., 2014. Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb Pour un co-développement de filières territorialisées. Jean-Louis Rastoin et El Hassan Benabderrazik Mai 2014
- Rezgui, M., Zairi, A., Bizid, E., Ben Mechlia, N., 2005. *Cahiers Agricultures* 14, 391–397.
- Ringler, C., Bhaduri, A., Lawford, R., 2013. The nexus across water, energy, land and food (WELF): potential for improved resource use efficiency? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 617-624.
- Ryan, J., Pala, M., Masri, S., Singh, M., Harris, H., 2007. Rainfed wheat-based rotations under Mediterranean conditions: Crop sequences, nitrogen fertilization, and stubble grazing in relation to grain and straw quality. *European Journal of Agronomy* 28 (2008), 112–118.
- Savin, R., Slafer, G. A., Cossani, C. M., Abeledo, L. G., & Sadras, V. O. (2014). Cereal yield in Mediterranean-type environments: Challenging the paradigms on terminal drought, the adaptability of barley vs wheat and the role of nitrogen fertilization. *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy: Second Edition*, 141–158.
- Ryan, J., Masri, S., Singh, M., Pala, M., Ibrikci, H., Rashid, A., 2008. Total and Mineral Nitrogen in a Wheat-Based Rotation Trial under Dryland Mediterranean Conditions. *Basic and Applied Dryland Research* 2, 34–46.
- Sadok, W., Sinclair, T. R. 2011. Crops Yield Increase under water-limited conditions: Review of recent physiological advances for Soybean genetic improvement. *Advances in agronomy*, 113, 313-337.
- Sadras, V. O., 2005. A quantitative top-down view of interactions between stresses: theory and analysis of nitrogenwater co-limitation in Mediterranean agro-ecosystems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 5611, 1151-1157.
- Sayar, R., Khemira, H., Kharrat, M. 2007. Inheritance of deeper root length and grain yield in half-diallel durum wheat *Triticum durum* crosses. *Annals of Applied Biology*, 1512, 213-220.
- Selmi, H., 2016. <https://aires-protegees-en-tunisie.jimdo.com/cartotheque/> /carte-bioclimatique
- Shatar, T. M., Mcbratney, A. B., 2004. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *The Journal of Agricultural Science* 142, 553–560.
- Singleton, P., Thies, J., Bohlool, B.B., 1992. Useful models to predict reponse to legume inoculation. *Biological Nitrogen Fixation and Sustainability of Tropical Agriculture*, 245–256.

- Sissons, M., 2008. Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Food*, 22, 75-90.
- Soil Survey Staff, 1998. Keys to soil taxonomy, 8th ed., United States Department of Agriculture, 399.
- Soltani, A., Sinclair, T.R., 2011. A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crop Res.* 124, 252-260.
- Soltani, A., Sinclair, T.R., 2012. Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield. CAB International, Wallingford, UK.
- Soltani, A., Maddah, V., Sinclair, T.R., 2013. SSM-wheat: a simulation model for wheat development, growth and yield. *Int. J. Plant Prod.* 7: 711-740.
- Souissi, I., Boisson, J. M., Mekki, I., Theronds, O., Flichman, G., Wery, J., Belhouchette, H., 2017. Regional Environmental Change Assessing the resilience of farming systems to climate change in the South Mediterranean area : a Tunisian case study. *Regional Environmental Change*.
- Spiertz, J.H.J., De Vos, N.M., 1983. Agronomical and physiological aspects of the role of nitrogen in yield formation of cereals. *Plant and Soil* 75, 379–391.
- Tanner, C. B., Sinclair, T. R., 1983. Efficient water use in crop production: Research or research. In “Limitations to Efficient Water Use in Crop Production” (H.M.Taylor, W.R.Jordan, and T.R.Sinclair, Eds.), pp.1–27. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 671-677.
- Van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance. A review. *Field Crops Research* 143, 4–17.
- Van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research* 52, 197–208.
- Voisin, A.S., Cellier, P., Jeuffroy, M., 2015. Fonctionnement de la symbiose fixatrice de N₂ des légumineuses à graines : Impacts Agronomiques et Environnementaux. *Innovations Agronomiques* 43, 139–160.
- Von Liebig, J., 1855. Die grundsätze der agricultur - chemie mit rücksicht auf die in England angestellten untersuchungen. Braunschweig, Germany: Friedrich Vieweg und Sohn Publ Co.
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W., Brun, F., 2014. Working with Dynamic Crop Models : Methods, Tools and Examples for Agriculture and Environment.
- Wang, D., Xu, Z.Z., Zhao, J.Y., Wang, Y.F., Yu, Z.W., 2011. Excessive nitrogen application decreases grain yield and increases nitrogen loss in a wheat soil system. *Acta Agr Scand B-Soil and Plant Science* 61, 681–692.
- Zhang, H., Oweis, H., 1999. Water–yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management Journal* 38: 195-211.

Annexes

Annexe 1. Données sur les céréales en Tunisie (DGPA, 2014)	129
Annexe 2. Données agriculteurs	131
Annexe 3. Questionnaire d'enquêtes auprès des producteurs de blé dur	133
Annexe 4. Protocole d'expérimentation sur quatre variétés Tunisiennes de blé dur	136
Annexe 5. Données ICARDA-Tel Hadya	139
Les rendements en grains de blé dur soumis à quatre traitements azotés et cultivé dans sept types de rotation biannuelle, à Tel Hadya, Syrie (ICARDA)	139
Annexe 6. Calcul de la production des grains et des protéines et des apports azotés avec différents scénarios dans une exploitation de cinquante hectares en rotation triennale, dans des conditions méditerranéennes	141
Annexe 7. Calcul de VPD	142
Annexe 8. Paramètres « Location » du modèle SSM-wheat	144
Annexe 9. Paramètres « Management » du modèle SSM-wheat	144
Annexe 10. Paramètres « SOIL » du modèle SSM-wheat	145
Annexe 11. Paramètres « CROP » du modèle SSM-wheat	146
Annexe 12. Système d'équations pour le calcul de la photopériode pour le modèle SSM-wheat	148

Annexe 1. Données sur les céréales en Tunisie (DGPA, 2014)

Superficies

B	C	D	E	F	G	B	C	D	E	F	G
Superficies semées						Superficies récoltées					
Unité 1000 Ha						Unité 1000 ha					
Année	Blé dur	Blé T	Orge	Tritical	Total	Année	BD	BT	Orge	Tritical	total
1980	818	80	413		1311	1980	775	78	382		1235
1981	822	94	529		1445	1981	695	88	443		1226
1982	666	88	442		1196	1982	627	87	395		1109
1983	955	120	713		1788	1983	819	112	631		1562
1984	785	117	579		1481	1984	654	102	489		1245
1985	883	180	855		1918	1985	857	176	821		1854
1986	723	113	442		1278	1986	454	86	241		781
1987	867	153	677	14	1711	1987	820	151	639	14	1624
1988	598	102	478	12	1190	1988	239	60	151	8	458
1989	825	174	697	14	1710	1989	449	111	412	13	985
1990	795	161	580	16	1552	1990	733	149	509	16	1407
1991	894	179	573	17	1663	1991	873	178	552	16	1619
1992	836	145	502	16	1499	1992	790	140	477	16	1423
1993	909	178	564	12	1663	1993	858	173	512	11	1554
1994	810	139	523	9	1480	1994	410	60	245	5	720
1995	773	139	420	6	1338	1995	362	53	122	5	542
1996	1102	168	719	6	1995	1996	1 088	161	704	6	1 959
1997	674	142	305	5	1126	1997	493	128	167	5	793
Sup_S	Sup-R	Production	Rdt_Sup_S	Rdt_Sup_R	Qu	Sup_S	Sup-R	Production	Rdt_Sup_S	Rdt_Sup_R	Qu

Production

B	C	D	E	F	G
Production					
Unité:qx 1000					
Année	BD	BT	Orge	Tritical	total
1980	7 413	1 287	2 958		11 658
1981	8 044	1 590	2 699		12 333
1982	7 529	1 632	3 386		12 547
1983	5 095	1 088	3 034		9 217
1984	5 843	1 272	3 121		10 236
1985	10 694	3 112	6 989		20 795
1986	3 782	960	1 318		6 060
1987	10 651	2 948	5 365	325	19 289
1988	1 670	530	629	70	2 899
1989	3 333	870	1 998	155	6 356
1990	8 973	2 246	4 775	337	16 331
1991	14 235	3 626	7 208	442	25 511
1992	13 231	2 610	5 698	411	21 950
1993	11 336	2 790	4 778	235	19 139
1994	4 362	664	1 450	67	6 543
1995	4 723	585	803	87	6 198
1996	17 056	3 121	8 347	149	28 672
1997	7 232	1 617	1 604	86	10 539
Sup_S	Sup-R	Production	Rdt_Sup_S	Rdt_Sup_R	Qu

Rendement

A	B	C	D	E	F
Rdt/ Sup Semé					
					Unité: qx/ha
Année	BD	BT	Orge	Tritical	Total
1980	9	16	7		9
1981	10	17	5		9
1982	11	19	8		10
1983	5	9	4		5
1984	7	11	5		7
1985	12	17	8		11
1986	5	8	3		5
1987	12	19	8	23	11
1988	3	5	1	6	2
1989	4	5	3	11	4
1990	11	14	8	21	11
1991	16	20	13	26	15
1992	16	18	11	26	15
1993	12	16	8	20	12
1994	5	5	3	8	4
1995	6	4	2	15	5
1996	15	19	12	25	14
1997	11	11	5	17	9
►	Sup_S	Sup-R	Production	Rdt_Sup_S	Rdt_Su

A	B	C	D	E	F
Rendement/Sup_récolté					
					Unité qx/ha
Année	BD	BT	Orge	Tritical	Total
1980	10	17	8		9
1981	12	18	6		10
1982	12	19	9		11
1983	6	10	5		6
1984	9	12	6		8
1985	12	18	9		11
1986	8	11	5		8
1987	13	20	8	23	12
1988	7	9	4	9	6
1989	7	8	5	12	6
1990	12	15	9	21	12
1991	16	20	13	28	16
1992	17	19	12	26	15
1993	13	16	9	21	12
1994	11	11	6	12	9
1995	13	11	7	18	11
1996	16	19	12	25	15
1997	15	13	10	17	13
◀	Sup_S	Sup-R	Production	Rdt_Sup_S	Rdt_Su

Engrais chimiques

A	B	C	D	E	F	G	H
Engrais chimiques							
							Unité: Tonnes
Année	Super 45	Sn	Urée	Ammonitre	DAP	مكافئ أمونيتر	د
1981	52000			65000		12	
1982	77500			84000		12	
1983	53000			67500		6	
1984	66000			73500		9	
1985	63000			91500		12	
1986	74500			97500	1000	8	
1987	73500			106500	7500	13	
1988	60000			70500	12000	7	
1989	0			82500	31500	7	
1990	39000			84000	38500	12	
1991	43000			95000	31000	16	
1992	41000			103500	39000	17	
1993	38500			103000	46500	13	
1994	22000			68000	42000	11	
1995	21000			40000	65000	13	
1996	30000			44000	150000	16	
1997	42000			125000	52600	15	
►	Sup_S	Sup-R	Production	Rdt_Sup_S	Rdt_Sup_R	Quantité d'engr	

Annexe 2. Données agriculteurs

BD 1 (88/89-94/95) (INAT)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI		
ANNEE	DEL	PAR	NE	SAU	SI	CI	SE	D	CUL	VAR	PC	PI	TS	SEM	DAS	DOS	MS	P	N	NAN	DES	MI	VE	NI	DI1	DI2	DI3	DI4	DI5	DI6	REC	RDM	PA	PAN		
88/89	SIL	S		4,22		2,6	PI	4,5	BD	N	N	T	N	O	25.11	9	N	90	86	2	0	A	1062	4					0	0	MB	24		299,5		
88/89	SIL	S		60		8	P	20	BD	N	N	T	N	O	20.12	130	N	68	94	3	0	A	2570	6						MB	22		299,5			
88/89	SIL	S		4,5		1	P	2	BD	N	N	T	N	O	20.11	125	N	90	67	1	A	750	4					0	0	MB	13		299,5			
89/90	SIL	S	YAAGOURI ABDELJELIL	30	4	0,5	P	4	BD	R	CM	T	LE	S	17.11	140	V	150	200	2	1.02	G	2448	2	1.11	1.02		0	0	0	0	MB	46	74	373,8	
89/90	SIL	S	DENDENI ALI	3	3	0,5	P	2	BD	R	CM	T	LO	S	29.11	140	V	200	150	2	1.02	G	300	2	1.12	1.01		0	0	0	0	MB	32	140	373,8	
89/90	SIL	S	DENDENI AYACHI	3	3	0,5	P	2,5	BD	R	CM	T	LO	S	1.12	140	V	200	150	2	1.02	G	504	4	1.12	1.01	1.02	1.03		0	MB	40	160	373,8		
89/90	SIL	S	OUESLATI MABROUK	70	5	0,5	O	4	BD	R	J	T	M	S	6.12	140	V	200	200	3	1.02	G	1900	5	1.12	1.01	1.03	15.03	1.04	0	MB	36	86	374,5		
89/90	SIL	S	SAYARI MED.	10	3	0,5	O	4	BD	R	J	T	M	S	17.11	140	V	150	150	2	1.02	G	1266	2	1.11	1.12		0	0	0	0	MB	24	108	373,8	
89/90	SIL	S	ZARROUG MED.HABIB				P	10	BD	R	J	T	M	S	1.12	140	V	100	100	2	0	A	700	4	1.12	1.01	1.02	1.03		0	MB	40	150	373,8		
89/90	SIL	S	KHARROUBI KHELIFA	13,5			P	4,5	BD	R	CM	T	M	S	10.12	140	M	200	200	2	0	A	1200	3	1.12	1.01	1.02		0	0	0	MB	60	120	373,8	
89/90	SIL	S	B.SALAH MOKHTAR	4,69	4,69		P	4,5	BD	R	CM	T	LO	S	10.12	140	M	200	200	2	0	A	1200	3	1.12	1.01	1.02		0	0	0	MB	50	100	373,8	
89/90	SIL	S	YAHYAOUI DJEDIDI	18,9			P	4,5	BD	R	CM	T	LO	S	10.12	140	M	200	200	2	0	A	1200	3	1.01	1.02	1.03		0	0	0	MB	60	120	373,8	
89/90	SIL	S	KHARROUBI HABIB	4			P	5	BD	R	CM	T	M	S	2.12	140	V	200	200	2	0	A	3600	2	1.12	1.02		0	0	0	0	MB	36	66	373,8	
90/91	SIL	S	FATHALLA AHMED	200	8	0,5	P		BD	K	J	T	V	S	20.11	140	M	120	220	2	1.02	A	850	4	1.11	1.12	1.01	1.02		0	0	MB	36	150	595,6	
90/91	SIL	S	KHDIRI MABROUK	2,3	2,3		P	4,5	BD	R	CF	T	A	S	28.11	140	M	300	400	2	0	A	518	2	1.12	1.01		0	0	0	0	MB	24	90	595,6	
90/91	SIL	S	B.ABID FERJANI	4,69	4,69		P	4,5	BD	R	CF	T	A	S	28.11	140	M	300	400	2	0	A	648	2	1.12	1.01		0	0	0	0	MB	56	120	595,6	
90/91	SIL	S	DENDENI MONGI	19			P	BD	R	J	F	LO	S	17.12	140	V	150	300	3	A		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MB	54	54	764,1	
90/91	SIL	S	DENDENI BRAHIM	15			P	BD	R	N	F	LO	S	18.12	140	V	150	300	3	A		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MB	41	55	764,1	
90/91	SIL	S	YAGOURI MOULDI	15			P	3	BD	R	CM	T	M	S	17.12	140	V	150	300	3	G	518	1	1.12		0	0	0	0	0	0	MB	42	53	764,1	
90/91	SIL	S	CHEFIF HAMMADI	5			P	1,5	BD	R	CM	T	LO	S	18.12	140	V	150	300	3	A	400	1	1.12		0	0	0	0	0	0	0	MB	28	25	764,1
90/91	SIL	S	OUESLATI AMOR	7	7		P	BD	R	BT	F	N	S	20.12	140	M	200	400	2	1.02	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MB	48	35	408,8
90/91	SIL	S	DRIDI MED.		21	1	P	BD	R	J	F	AS	S	11.12	170	M	300	100	1	1.02	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MB	30	55	408,8
91/92	SIL	D	DENDENI KHOUMEIS				N	0,5	N		BD	K	CM	T	N	S	5.12	180	V	180	300	3	A	500	2	1.01	1.03		0	0	0	0	MB	26		503,8
91/92	SIL	D	BOUBAKRI MOULDI				N	0,5	N		BD	R	CM	T	N	S	5.12	180	N	180	300	3	A	500	2	1.01	1.03		0	0	0	0	MB	25		503,8
91/92	SIL	D	ZARROUK SALAH				N	0,5	N		BD	R	J	T	N	S	1.12	180	N	180	300	3	A	950	3	1.12	1.03	1.04		0	0	0	MB	37		613,4
91/92	SIL	D	B.JANNETTE TARAK				N	0,5	N		BD	R	J	T	N	S	1.11	180	N	180	300	3	A	650	3	1.12	1.03	1.04		0	0	0	MB	30		613,4
92/93	SIL	D	R.GANDOURI CHOKRI				N	1	N		BD	K	CM	T	LO	S	16.11	120	M	200	200	2	A	2764	4	1.12	1.01	1.02	1.03		0	0	MB	42	33	457,1
	J	D	siliana																																	

BD 2 (2011/2012) (INGC)

P. cul	Soil simpling				IFM					Farmers Practices				
	P2O5 ppm	K2O ppm	M.O (%)	Mh	DAP	Potasse	AN	RDT	Paille	DAP	Potasse	AN	RDT	Paille
Blé Dur	8,18	248	0,85	22,95	100	50	377	24,24	105	100		100	17,00	72
Petit Pois	10,33	148	1,48	39,96	50	75	360	27,92	156	150		200	29,00	128
Blé Dur	15,01	150	1,69	45,63	0	75	354	26,42	113	50		100	16,00	74
Blé Dur	14,32	151	1,9	51,3	0	75	349	25,40	122	200		100	14,00	63
Février	2,29	169	1,69	45,63	150	75	354	25,15	94	100		200	20,00	86
Jachère	17,41	166	1,06	28,62	0	75	371	23,48	91	150		100	10,00	67
Février	19,41	182	2,03	54,81	0	75	345	24,72	103	75		100	23,00	83
Blé Dur	9,37	220	2,12	57,24	100	50	343	26,59	117	100		150	10,00	51
Tabac	25,32	209	1,27	34,29	0	50	366	25,43	98	100		200	17,00	75
Blé Dur	19,59	274	2,12	57,24	0	50	343	30,71	145	150		150	20,00	100
Février	13,29	339	1,93	52,11	100		348	20,55	93	100		200	7,00	33
Blé Dur	2,98	627	2,12	57,24	150		343	26,63	80	100	0	100	19,54	74
PDT	14,76	1115	2,54	68,58	0		331	28,69	104	50		300	23,00	81
PDT	9,49	419	2,12	57,24	100		343	27,80	121	75		200	20,00	74
Février	9,42	400	2,75	74,25	100		326	24,53	107	100		150	20,00	94
Blé Dur	4,35	864	2,75	74,25	150		326	24,33	84	100		400	29,00	128
Blé Dur	21,36	325	2,12	57,24	0		343	28,07	130	75		300	27,00	123

BD 3 (12/13-13/14)

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
Localité	SAU (ha)	S de BD (ha)	Elevage	Fum av BD	Rdt (q/ha)	Pailles (q/ha)	PC	Ante PC	Var	d Semis	d Récolte	Md Semis	Sup45 (kg/ha)	P205_Sup45 (kg/ha)	d Sup45	DAP (kg/ha)	d DAP	P205_DAP (kg/ha)	P205 tot (kg/ha)
Ain Ghrab	26	3 oui	non		18	33 Cod			K	15-nov	01-juil	Epd				300 S		138	138
Sidi Bouali	20,5	4,5 oui	oui		40	33 Fngr			K	20-nov	01-juil	Epd				200 S		92	92
El Ghri	6	1,2 oui	non		54	60 Og+Av	Ves		R	20-nov	01-juil	Epd				200 S		92	92
Zewyet Jbeli	16	1 oui	non		25	30 Ves	BD		K	15-nov	01-juil	Epd				150 S		69	69
Skalba	15	6 oui	non		20	40 BD			K	15-nov	18-juin	Epd				150 S		69	69
guedes	20	6 non	non		35	40 Fév+PCh	BD		M	15-nov	25-juin	Sm				100 S		46	46
guedes	20	2 non	non		28	32 Og	Fév+PCh+Pp		M	15-nov	25-juin	Sm				100 S		46	46
Knisia	45	3 oui	non		42	35 CM			M	16-nov	20-juin	Sm	150		68 Av S	125 S		58	125
Knisia	45	7 oui	non		40	35 Fév+PCh			M	16-nov	20-juin	Sm	150		68 Av S	125 S		58	125
Sidi Hassoun	2	0,7 oui	non		35	51 Fév+PCh	BD		K	20-nov	08-juil	Sm				300 S		138	138
zewyet chabaan		3,5 oui	non		35	32 Fév+PCh			K	20-nov	10-juil	Vo				100 S		46	46
sidi hassoun	20	10 oui	non		36	30 Fév+PCh			M-N	15-nov	10-juin	Vo				100 S		46	46
sidi hassoun	20	5 oui	non		20	30 Av+Og			M-N	15-nov	10-juin	Vo				100 S		46	46
Bouhbib		1 oui	non		26	30 Fév+PCh			K	12-nov	05-juil	Epd				200 S		92	92
zewyet chabaar	42	6 oui	non		37	32 Fév+PCh	Av+Og		M	15-nov	05-juil	Vo				200 S		92	92
Sidi Hassoun		2 oui	non		40	50 Fév+PCh	BD		N	25-nov	30-juin	Vo				150 S		69	69
El Wedyen	20	5 oui	non		30	45 BD	PCh+Fév		K	15-nov	05-juil	Sm				200 S		92	92
El Wedyen	20	10 oui	non		42	45 Fngr+ Ve	Av+Og+Fngr		K	15-nov	05-juil	Sm				200 S		92	92
zewyet chabaar	6	0,7 oui	non		35	42 Fév	Og		K	15-nov	06-juil	Vo				0 S		0	0
Hzeyzia	10	0,5 oui	non		28	35 Av	Og		K	05-nov	05-juil	Vo				200 S		92	92
zewyet chabaar	7	3 oui	non		32	65 Fév+PCh	BD		K	01-nov	05-juil	Vo				150 S		69	69
Bouhbib	9	1,5 oui	non		28	38 BD	PCh		K	01-nov	10-juil	Vo				200 S		92	92
Eriinin	60	20 oui	non		45	50 Fév+PCh	BD		K	20-nov	25-juin	Sm						0	0
Eriinin	3	1,5 oui	non		35	40 Fév	Og		K	28-nov	28-juin	Vo	200		90 Av S				90
Eriinin	15	3 oui	non		40	38 Fév+PCh	BD		M	15-déc	28-juin	Vo				200 S		92	92
Eriinin	5	0,8 oui	non		42	35 PCh+Fév	BD		M	20-nov	05-juil	Vo				188 S		86	86
Eriinin	5	0,4 oui	non		25,0	35 CM	BD		M	20-nov	05-juil	Vo				143 S		66	66
Eriinin	6	1,5 oui	non		42	40 Fngr+Ves	Ves+Av		K	20-nov	26-juin	Sm				150 S		69	69

Annexe 3. Questionnaire d'enquêtes auprès des producteurs de blé dur

Numéro de l'enquête : Date :

Nom de l'enquêteur :

Gouvernorat :

Délégation :

1-Identification du producteur

Nom et Prénom de l'agriculteur:.....

Téléphone :

2-Identification de l'exploitation

Localisation du siège d'exploitation

Localité:

Coordonnées géographiques :

N :

E :

N° du point GPS :

.....

Statut juridique de l'exploitation

I__IPrivé

I__ISMVDA

I__IOTD

I__IUCP

Date d'installation :

SAU : I__I__I Iha dont I__I__I en sec : et I__I__I en irrigué :

Point d'accès à l'eau d'irrigation

Accès privé :

I__I Lac lebna :

I__I Lac ou barrage collinaire :

Lequel ? :

I__I Puits :

I__I Forage :

Accès public :

I__I Périmètre irrigué :

Lequel ? :

Elevage :

I__Ioui

I__Inon

Taille actuelle du troupeau reproductif

	Brebis	Vaches laitières	Vaches non laitières
Nombre sur l'exploitation			

e. Traitement phytosanitaire

Apports	1	2	3	4	Nombre d'apports
Date					
Produit phyto					
Quantité (...)					Total

f. Cycle de culture de blé dur

Date de semis :

Date de récolte :

Et les différents stades de développement (si c'est possible)

Semis

Récolte

g. Autres éléments de l'itinéraire technique

Travail du sol : ☐ labour profond

☐ labour léger

Désherbage chimique : ☐ oui

☐ non

.....

Fertilisation P et K ☐ oui

☐ non

.....

Mode de semis ☐ à la volée

☐ semoir

Annexe 4. Protocole d'expérimentation sur quatre variétés Tunisiennes de blé dur

1. Objectifs :

L'objectif de la mise en place d'un dispositif expérimental est de mesurer les paramètres nécessaires pour l'évaluation et l'utilisation des modèles intégrant la dynamique de croissance de la plante et de prélèvement des ressources (lumière, eau et azote) au cours du cycle du blé dur. Le premier modèle, est un modèle simple permettant de calculer à posteriori l'azote absorbé lorsqu'on ne connaît que le rendement en grains. Concernant le deuxième modèle, il s'agit d'un modèle de bilan hydrique, permettant d'évaluer à posteriori le parcours de stress hydrique subi par la culture et de calculer la quantité d'eau consommée par la culture tout au long du cycle. Les données collectées doivent permettre de tester l'utilisation de la solution de modélisation Simpatric (collaboration avec Nicolas Bertrand) et si possible aussi le modèle SSM (collaboration avec Hélène Marrou).

Cet essai est mis en place au sein d'un essai variétal de l'UE INRA Diascope de Mauguio ce qui permettra de faire le lien avec certains travaux de l'UMR AGAP en lien avec l'UMT Novadur et le projet SIMAG.

2. Protocole expérimental et paramètres étudiés

2.1. Matériel végétal

Les semences des variétés de blé dur (*Triticum durum*) utilisées dans cette étude sont fournies par l'institut nationale de recherche agronomique de Tunis (INRAT). L'essai porte sur quatre variétés de blé dur améliorées : Karim, Razzek, Maali et Nasr.

2.2. Dispositif expérimental

L'essai est conduit en plein champs et géré par l'unité expérimentale de l'INRA à Mauguio. Cette région est caractérisée par un climat de type méditerranéen tempéré évoluant vers le semi-aride. Le travail du sol a été réalisé juste avant le semis qui a eu lieu le 18/12/2014. La densité de semis pour une culture de blé dur est en moyenne de 150 kg/ha. De ce fait, la quantité de semences obtenue qui est de 120g pour chaque variété permet de semer une superficie de 7 à 8 m².

Le dispositif expérimental est réalisé par l'équipe de l'unité expérimentale et il est constitué par des petites parcelles élémentaires d'environ 7.5 m² (1.5mx5m), dont quatre parcelles seront réservées pour nos variétés tunisiennes. Par conséquent, on aura un seul traitement par variété. Les parcelles seront séparées et entourées par des petites parcelles d'orge pour éviter l'effet bordure (figure 1).

Afin de mesurer l'humidité du sol, des tubes de sonde à neutron seront placés au centre de chaque parcelle. Des placettes d'une superficie de 1 m² seront également mises au milieu de chaque parcelle pour mesurer les paramètres phénologiques et les composantes du rendement.

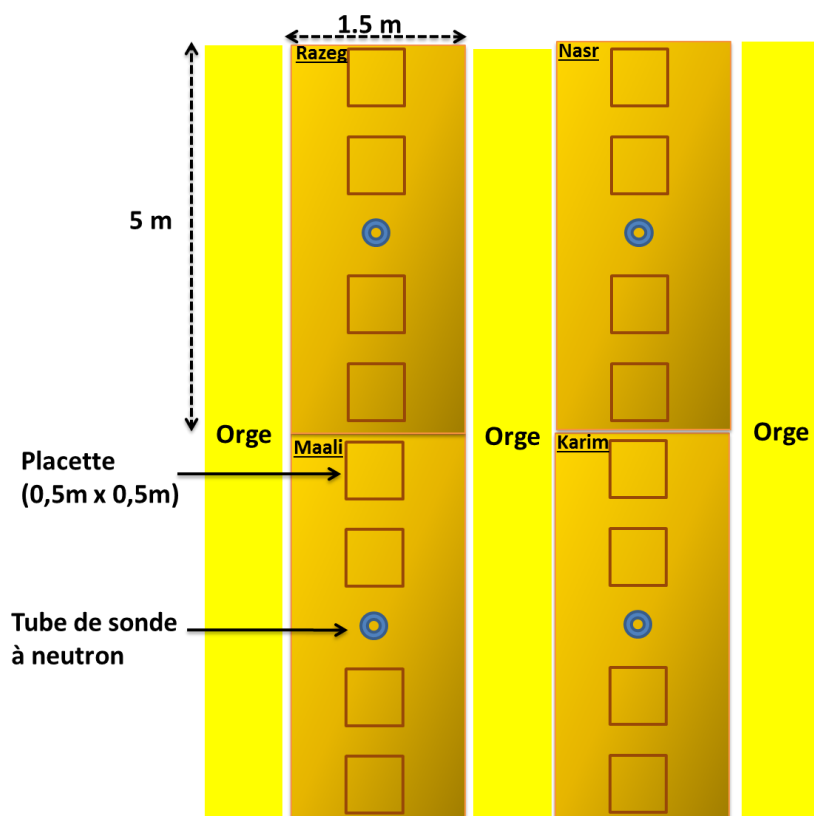


Figure 1 : Dispositif expérimental

L'irrigation et la fertilisation azotée seront gérées par l'équipe de Manguio avec les autres parcelles de blé dur installées dans la même parcelle. La fertilisation azotée est dépendante des précipitations, mais elle sera distribuée en trois apports. Quant à l'irrigation, elle dépend plutôt de l'humidité du sol qui est généralement déterminée visuellement.

2.3.Paramètres mesurés

Pour calculer l'azote absorbé et paramétrer le modèle du bilan hydrique, nous mesurer les paramètres suivants :

2.3.1. Variables à mesurer au cours du cycle

❖ **Au niveau du sol :**

L'humidité du sol dans les stades clés (semis, levée, montaison, floraison et maturation). Cette mesure doit être prise par la sonde à neutron.

❖ **Données climatiques :**

La pluie journalière, l'évapotranspiration de référence ET_0 (mesurée à la station ou calculée avec l'équation de Penman Monteith), et les températures maximales et minimales journalières et la vitesse du vent.

❖ **Au niveau de la plante :**

- Les dates des différents stades de développement

- L'évolution de la biomasse aérienne
- Ces mesures ont été réalisées avec un capteur linéaire de rayonnement de type ceptomètre. Ce capteur est placé à la fois en dessus et en dessous du couvert et perpendiculairement aux rangs de blé.
- L'accumulation de l'azote par la plante dans les différents stades (si possible).

2.3.1. Variables à mesurer après la récolte

- Le rendement en grains et en pailles (poids sec) : ce qui permet de calculer l'indice de récolte (IR).
- La teneur en azote des grains et des pailles (si possible).

Fiche d'ITK de l'essai de Mauguio

Semis : 18 Décembre 2014

Variétés : Maali, Razek, Nasr et Karim (4variétés tunisiennes)

09/01/2015 : Début de la levée

15/01/2015 : Première irrigation 15 mm

12/02/2015 : Prélèvement des échantillons des sols des différents horizons et mise en place des tubes de sondes à neutron.

Traitement Herbicide : dans la semaine du 23 au 27 Février

02/04/2015 : Apport de 50 unités d'azote

03/04/2015 : Deuxième irrigation 15 mm

Traitement phyto "anti folle avoine" : dans la semaine du 13 au 17 Avril

Epiaison : dans la semaine du 27 Avril

05/05/2015 : Stade Floraison et sortie des étamines

28/05/2015 : Troisième irrigation 20 mm

Stade Pâteux : 15/06/2015

Annexe 5. Données ICARDA-Tel Hadya

Les rendements en grains de blé dur soumis à quatre traitements azotés et cultivé dans sept types de rotation biannuelle, à Tel Hadya, Syrie (ICARDA)

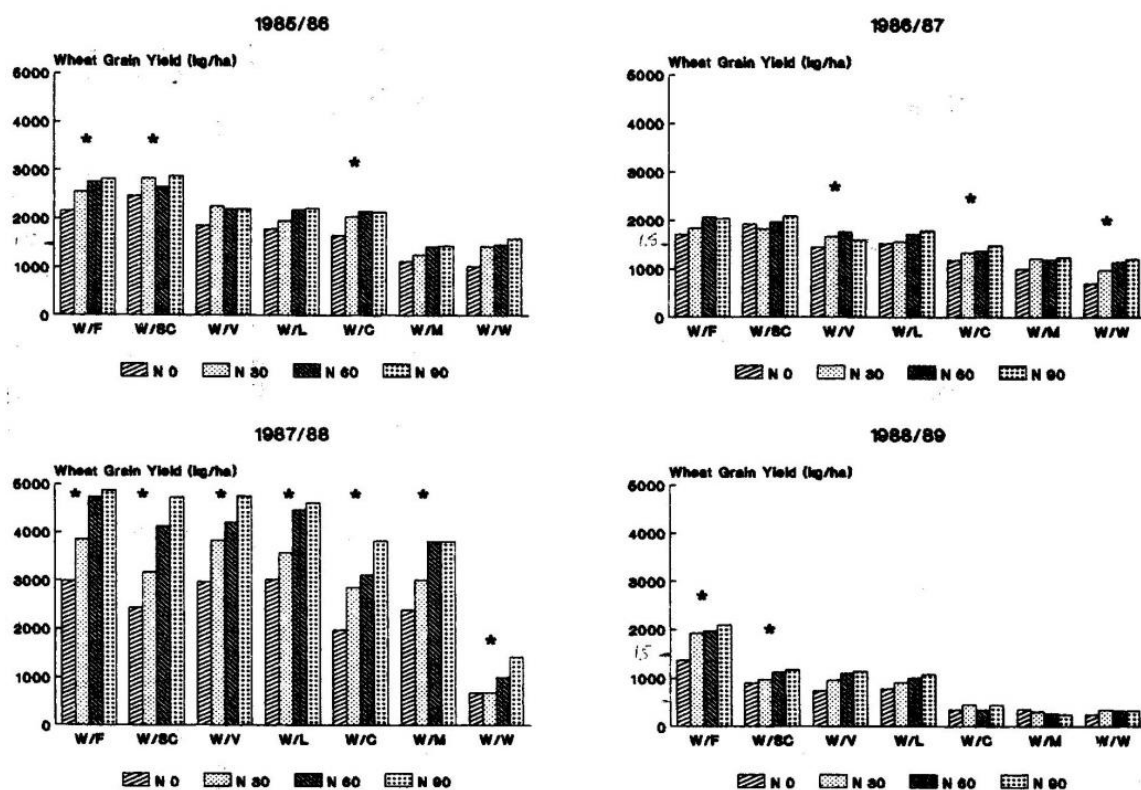


Figure 3.5.3 Grain yields of durum wheat (kg/ha) in seven two-course rotations at Tel Hadya, 1985-86 to 1988-89. See text for key to x axis legend. * signifies a statistically significant effect of nitrogen within the rotation ($P \leq 0.05$).

Biomasses totales de blé dur soumis à quatre traitements azotés et cultivé dans sept types de rotation biannuelle, à Tel Hadya, Syrie (Icarda)

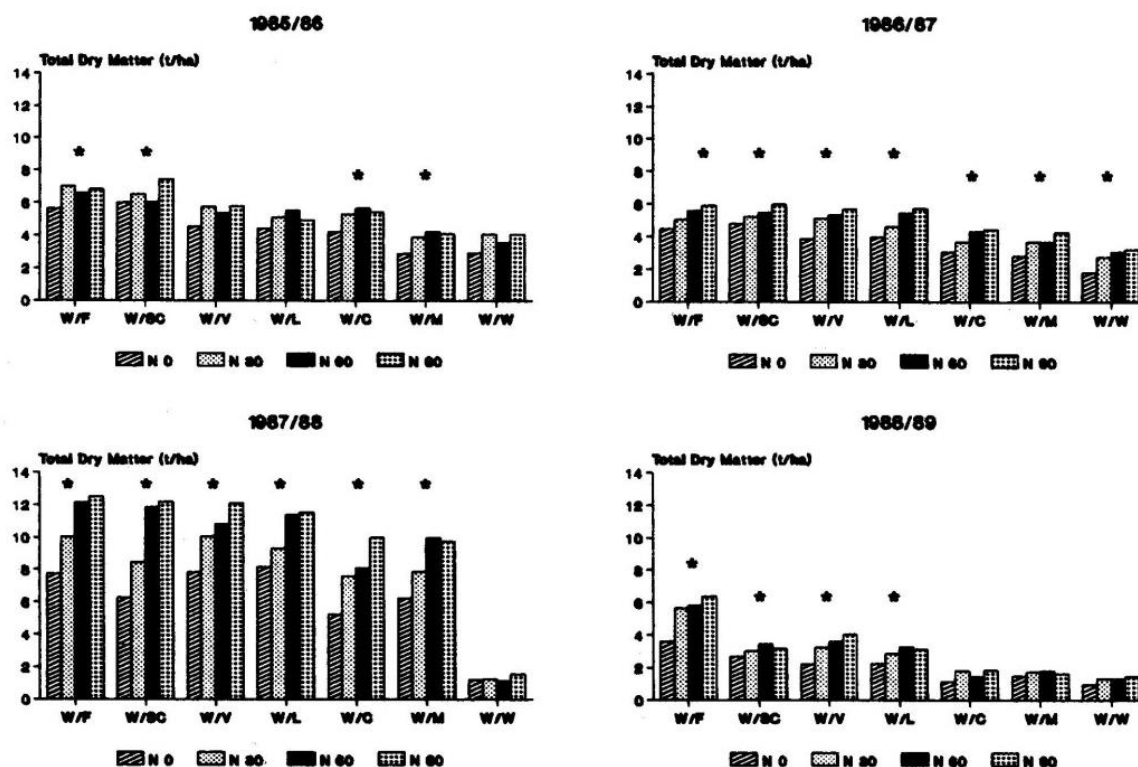


Figure 3.5.4 Total dry matter (t/ha) of durum wheat in seven two-course rotations at Tel Hadya, 1985-86 to 1988-89. See text for key to x axis legend. * signifies a statistically significant effect of nitrogen within the rotation ($P \leq 0.05$).

Annexe 6. Calcul de la production des grains et des protéines et des apports azotés avec différents scénarios dans une exploitation de cinquante hectares en rotation triennale, dans des conditions méditerranéennes

Précédent		Blé dur			Jachère			Pois chiche			Lentille		
N (kg/ha)		Grains (t/ha)	Protéines (kg/ha)	N (T)	Grains (t/ha)	Protéines (kg/ha)	N (T)	Grains (t/ha)	Protéines (kg/ha)	N (T)	Grains (t/ha)	Protéines (kg/ha)	N (T)
	0 Année 1	1,02	0,13	0	0,00	0,00	0	2,42	0,50	0	1,81	0,50	0
	0 Année 2	1,02	0,13	0	3,00	0,39	0	2,02	0,27	0	2,92	0,38	0
	0 Année 3	1,02	0,13	0	1,02	0,13	0	1,02	0,13	0	1,02	0,13	0
Production total		153	20		201	26		273	45		288	51	
Production/an		51	7		67	9		91	15		96	17	
	50 Année 1	1,52	0,20	2,5	0,00	0,00	0	2,42	0,50	0	1,81	0,50	0
	50 Année 2	1,52	0,20	2,5	4,36	0,57	2,5	3,17	0,42	2,5	4,29	0,56	2,5
	50 Année 3	1,52	0,20	2,5	1,52	0,20	2,5	1,52	0,20	2,5	1,52	0,20	2,5
Production total		228	30		294	39		355	56		381	63	
Production/an		76	10		98	13		118	19		127	21	
	100 Année 1	1,73	0,23	5	0,00	0,00	0	2,42	0,50	0	1,81	0,50	0
	100 Année 2	1,73	0,23	5	5,04	0,66	5	3,92	0,51	5	4,79	0,63	5
	100 Année 3	1,73	0,23	5	1,73	0,23	5	1,73	0,23	5	1,73	0,23	5
Production total		260	34		339	44		404	62		500	81	
Production/an		87	11		113	15		135	21		167	27	

Annexe 7. Calcul de VPD

$$VPD = VP_{DF} \times (VPT_{MAX} - VPT_{MIN})$$

$$VPT_{MIN} = 0,6108 \times \exp(17,27 \times T_{MIN} / (T_{MIN} + 237,3))$$

$$VPT_{MAX} = 0,6108 \times \exp(17,27 \times T_{MAX} / (T_{MAX} + 237,3))$$

$$VP_{DF} = 0,7 \text{ (Soltani et Sinclair, 2012)}$$

Tableau 1 : Calcul de VPD journalier moyen par mois et par an pour la région de Jendouba au nord de la Tunisie

	Tmin	Tmax	VPTmin	VPTmax	VPDF	VPD
Janvier	6,9	15,3	0,935	1,526	0,7	0,414
Février	7	15,8	0,940	1,570	0,7	0,441
Mars	7,7	17,2	0,980	1,698	0,7	0,502
Avril	9,7	19,6	1,104	1,940	0,7	0,585
Mai	12,6	23,7	1,308	2,423	0,7	0,781
Juin	16,4	27,7	1,624	2,993	0,7	0,959
Juillet	19,1	31,3	1,887	3,603	0,7	1,201
Août	20,1	31,6	1,994	3,658	0,7	1,165
Septembre	18,3	29	1,805	3,202	0,7	0,977
Octobre	14,8	24,8	1,483	2,570	0,7	0,761
Novembre	10,7	19,9	1,171	1,972	0,7	0,561
Décembre	8	16,3	0,998	1,615	0,7	0,431
					Moyenne	0,731

Source : Institut National de Météorologie (<http://www.meteo.tn>), Soltani et Sinclair (2012)

Tableau 2 : Calcul de VPD journalier moyen par mois et par an pour la région de Kairouan au centre de la Tunisie

	Tmin	Tmax	VPTmin	VPTmax	VPDF	VPD
Janvier	6,2	16,9	0,896	1,67	0,7	0,542
Février	6,9	18,3	0,935	1,805	0,7	0,61
Mars	8,2	20,2	1,01	2,005	0,7	0,696
Avril	10,6	23,3	1,164	2,372	0,7	0,846
Mai	14,1	28,3	1,425	3,088	0,7	1,164
Juin	17,9	32,9	1,766	3,906	0,7	1,498
Juillet	20,6	36,8	2,049	4,742	0,7	1,885
Août	21,1	36,3	2,106	4,627	0,7	1,765
Septembre	19,1	31,9	1,887	3,714	0,7	1,279
Octobre	15,0	26,5	1,5	2,811	0,7	0,918
Novembre	10,3	21,6	1,144	2,164	0,7	0,714
Décembre	7,2	17,8	0,952	1,756	0,7	0,563
	Moyenne					1,04

Source : Institut National de Météorologie (<http://www.meteo.tn>), Soltani et Sinclair (2012)

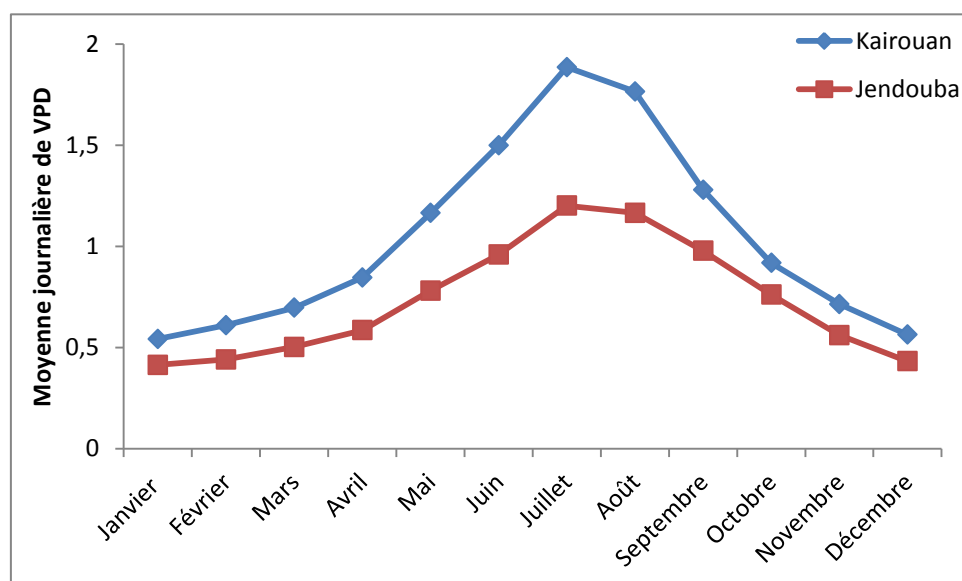


Figure 1. Moyenne journalière de la pression de vapeur d'eau saturante dans l'air par mois

Annexe 8. Paramètres « Location » du modèle SSM-wheat

<-- LocRowNo					
Location	Latitude	VPDF	Weather File Path & Name	WthFirstRow	Description
Mauguio	43,6	0,63	z\These_Yosser\SSM\Wheather\I	11	Mauguio, France

Fichier climat

	A	B	C	D	E	F
7						
8	Mauguio14_15					
9						
10	YEAR	DOY	SRAD	TMAX	TMIN	RAIN
11	2014	274	16,86	27,1	14,8	0
12	2014	275	17,39	27,1	13,8	0
13	2014	276	16,74	25,6		
14	2014	277	14,29	23,2		
15	2014	278	14,74	20,9		
16	2014	279	5,5	21,1		
17	2014	280	11,66	23,9		
18	2014	281	12,12	24,2	20,3	0
19	2014	282	8,13	24,2	19,8	1
20	2014	283	6,64	23,3	18,3	6
21	2014	284	15,2	24,3	16,3	0,5
22	2014	285	8,32	23,6	17,3	0
23	2014	286	11,85	23,5	19,5	0
24	2014	287	8,68	23	16,8	0
25	2014	288	11,83	21,7	13,9	0
26	2014	289	12,69	24,2	15	0
27	2014	290	13,74	26,6	17,6	0
28	2014	291	10,51	25,3	15,3	0
29	2014	292	13,46	24,7	17,5	0
30	2014	293	7,83	23	14,7	0
31	2014	294	11,94	25,3	15	0
32	2014	295	14,37	18,2	11,6	0
33	2014	296	13,3	20,1	7,9	0

DOY	-	Day of year
SRAD	MJ m-2 d-1	Solar radiation
RAIN	mm	Daily rainfall
TMAX	oC	Maximum temperature
TMIN	oC	Minimum temperature

Annexe 9. Paramètres « Management » du modèle SSM-wheat

<-- MangRowNo					
Code	Description:				
Mauguio_14/15	ITK pour toutes variétés Tunisiennes de BD				
yno	FixFind	Fyear	Sdoy		
1	1	2014	352		
nitrogen =					
Number of appl. =					
DAP- or CBD-based:					
	2				
	1				
	1				
No	DAP/CBD	Amount	Frac. Vol.	DAP/CBD/DOY	Amount
	(-)	(g/m2)	(%)	(-)	(mm)
1	105	5	4	15	15
2				93	15
3				148	20

Variable	Unit	Definition
DAP	-	Days after planting
DOY	-	Day of year
PDEN	m-2	Plant density
pday	-	Day of year (1-365) when crop is sown

water =	3
Number of irrig. =	3
DAP-, CBD- or DOY-	3

Annexe 10. Paramètres « SOIL » du modèle SSM-wheat

<-- SoilRowNo												
Code		Description:										
Mauguio_14/15		profil de la fosse 1										
NLYER	LDRAIN	SALB	U	CN2								
4	4	0,13	6	77							ppm	ppm
		cm.cm-1	cm.cm-1	cm.cm-1	-	-	-	g.cm-3	%	-	mg.kg-1	mg.kg-1
Layer#	DLYER	SAT	DUL	EXTR	DRAINF	MAI	FG	BDL	NORG	FMIN	NO3	NH4
1	180	0,40	0,2628	0,1168	0,4	0,20	0	1,46	0,0735	0,1	5	0
2	370	0,32	0,2352	0,0672	0,4	0,20	0	1,68	0,064	0,1	5	0
3	350	0,32	0,252	0,084	0,4	0,20	0	1,68	0,0535	0,1	2	0
4	500	0,35	0,256	0,064	0,4	0,22	0	1,6	0,0555	0,05	0	0
5	600	0,33	0,297	0,099	0,4	0,22	0	1,65	0,0375	0,05	0	0
6												
Variable		Unit	Definition									
BD1		g cm-3	Bulk density of top layer soil									
DRAINF		-	Drainage factor									
DUL		mm mm-1	Volumetric soil water content at drained upper limit									
EXTR		mm mm-1	Volumetric soil water content available for extraction by crop roots									
FG		%	Fraction coarse material in soil									
FMIN		-	Fraction soil organic nitrogen available for mineralization									
MAI		-	Soil moisture availability index (0-1) in soil profile									
NH4		g m-2	Amount of nitrogen in NH4 form in soil top layer									
NO3		g m-2	Amount of nitrogen in NO3 from in soil top layer									
NORG		g N m-2	Amount of soil organic nitrogen in top layer									

Annexe 11. Paramètres « CROP » du modèle SSM-wheat

1	2	3	5	6	7
CropColNo ->					
CROP:		Wheat	Wheat	Wheat	Wheat
Cultivar:		Karim	Razzak	Nasr	Maali
TBD =	oC	0	0	0	0
TP1D =	oC	27,5	27,5	27,5	27,5
TP2D =	oC				
TCD =	oC	40	40	40	40
TBVER =	oC	-1	-1	-1	-1
TP1VER =	oC	0	0	0	0
TP2VER =	oC	8	8	8	8
TCVER =	oC	12	12	12	12
VDSAT =	d	30	30	30	30
vsen =	-	0,002	0,002	0,002	0,002
cpp =	h	14	14	14	14
ppsen =	-	0,17	0,17	0,17	0,17
bdSOWEMR	bd	6	6	6	6
bdEMRTIL	bd	5	5	5	5
bdTILSEL	bd	8	8	8	8
bdSELBOT	bd	4	4	4	3
bdBOTEAR	bd	3	3	6	3
bdEARANT	bd	5	5	5	5
bdANTPM	bd	43	43	43	45
bdPMHM	bd	8	8	8	8
phyl =	oC / leaf	110	110	110	110
PLACON =	-	1	1	1	1
PLAPOW =	for PDEN=30	2,2	2,2	2,2	2,2
SLA =	m2 / g	0,02	0,02	0,02	0,02
TKILL =	oC	-5	-5	-5	-5
FRZLDR =	m2/m2/oC	0,01	0,01	0,01	0,01
TBRUE =	oC	0	0	0	0
TP1RUE =	oC	15	15	15	15
TP2RUE =	oC	22	22	22	22
TCRUE =	oC	35	35	35	35
KPAR =	-	0,65	0,65	0,65	0,65
IRUE =	g / MJ	2,2	2,2	2,2	2,2
FLF1A =	g/g	0,6	0,6	0,6	0,6
FLF1B =	g/g	0,3	0,3	0,3	0,3
WTOPL =	g / m2	160	160	160	160
FLF2 =	g / g	0,1	0,1	0,1	0,1
FRTRL =	-	0,22	0,22	0,22	0,22
GCC =	-	1	1	1	1
PDHI =	g/g/d	0,015	0,015	0,015	0,015
WDHI1 =	g/m2	0	0	0	0
WDHI2 =	g/m2	600	600	600	600
WDHI3 =	g/m2	1200	1200	1200	1200
WDHI4 =	g/m2	3200	3200	3200	3200
iDEPORT =	mm	200	200	200	200
MEED =	mm	1000	1000	1000	1000
RGR=	mm/bd	30	30	30	30
TEC =	Pa	5,8	5,8	5,8	5,8
WSSG =	-	0,3	0,3	0,3	0,3
WSSL =	-	0,5	0,5	0,5	0,5
WSSD =	-	0,4	0,4	0,4	0,4
FLDKL =	d	20	20	20	20
SLNG =	g m-2	1,8	1,8	1,8	1,8
SLNS =	g.m-2	0,4	0,4	0,4	0,4
SNCG =	g.g-1	0,015	0,015	0,015	0,015
SNCS =	g.g-1	0,0051	0,0044	0,0045	0,0052
GNC =	g.g-1	0,0209	0,0195	0,0202	0,0219
MXNUP =	g.m-2.d-1	0,25	0,25	0,25	0,25

Variable	Unit	Definition							
TBD	oC	Base temperature for development							
TBVER	oC	Base temperature for vernalization							
TCD	oC	Ceiling temperature for development							
TCVER	oC	Ceiling temperature for vernalization							
TP1D	oC	Lower optimum temperature for development							
TP1VER	oC	Lower optimum temperature for vernalization							
TP2D	oC	Upper optimum temperature for development							
TP2VER	oC	Upper optimum temperature for vernalization							
VDSAT	d	Number of vernalization days which saturates vernalization response							
vsen	-	Vernalization sensitivity coefficient							
cpp	h	Critical photoperiod							
ppsen	-	Photoperiod sensitivity coefficient							
bd	bd	Biological day per calendar day							
bdSOWEMR		From seedling to emergence							
bdEMRTIL		From emergence to tillering							
bdTILSEL		From tillering to the semi-bolting							
bdSELBOT		From the semi-bolting to bolting							
bdBOTEAR		From bolting to heading							
bdEARANT		From heading to flowering							
bdANTPM		From flowering to the maturity							
bdPMHM		From maturity to harvest							
PHYL	oC per leaf	Phyllochron							
PLACON	-	A coefficient (constant) in power relationship between plant leaf area and mainstem node number							
PLAPOW	-	A coefficient (exponent) in power relationship between plant leaf area and mainstem node number							
SLA	m ² g ⁻¹	Specific leaf area							
IRUE	g MJ ⁻¹	Radiation use efficiency under optimal growth conditions							
KPAR	-	Extinction coefficient for photosynthetically active radiation (PAR)							
TBRUE	oC	Base temperature for dry matter production							
TCRUE	oC	Ceiling temperature for dry matter production							
TP1RUE	oC	Lower optimum temperature for dry matter production							
TP2RUE	oC	Upper optimum temperature for dry matter production							
FLF1A	g g ⁻¹	Partitioning coefficient to leaves during main phase of leaf area development at lower levels of total crop mass							
FLF1B	g g ⁻¹	Partitioning coefficient to leaves during main phase of leaf area development at higher levels of total crop mass							
FLF2	g g ⁻¹	Partitioning coefficient to leaves from termination leaf growth on mainstem to beginning seed growth							
FRTRL	g g ⁻¹	Fraction crop mass at beginning seed growth which is translocatable to grains							
GCC	g g ⁻¹	Grain conversion coefficient							
DEPORT	mm	Current depth of roots							
MEED	mm	Maximum effective depth of water extraction from soil by roots							
TEC	Pa	Transpiration efficiency coefficient							
WSSD	-	A coefficient that specifies acceleration or retradation in development in response to water deficit							
WSSG	-	FTSW threshold when dry matter production starts to decline							
WSSL	-	FTSW threshold when leaf area development starts to decline							
GNC	g g ⁻¹	Grain nitrogen concentration							
MXNUP	g N m ⁻² d ⁻¹	Maximum uptake (fixation) rate of nitrogen							
SLNG	g N m ⁻²	Specific leaf nitrogen in green leaves (target)							
SLNS	g N m ⁻²	Specific leaf nitrogen in senesced leaves (minimum)							
SNCG	g N g ⁻¹	Stem nitrogen concentration in green stems (target)							
SNCS	g N g ⁻¹	Stem nitrogen concentration in senesced stems (minimum)							

Annexe 12. Système d'équations pour le calcul de la photopériode pour le modèle SSM-wheat

$$Pi = 3,141592654 : RDN = Pi / 180$$

$$ALPHA = 90 + SABH$$

$$SMA3 = 0,9856 \times DOY - 3,251$$

$$LANDA = SMA3 + 1,916 \times \sin(SMA3 \times RDN) + 0,02 \times \sin(2 \times SMA3 \times RDN) + 282,565$$

$$DEC = 0,39779 \times \sin(LANDA \times RDN)$$

$$DEC = \text{Atn}(DEC / \text{Sqr}(1 - DEC^2))$$

$$DEC = DEC / RDN$$

$$TALSOC = 1 / \cos(lat \times RDN)$$

$$CEDSOC = 1 / \cos(DEC \times RDN)$$

$$SOCRA = (\cos(ALPHA \times RDN) \times TALSOC \times CEDSOC) - (\tan(lat \times RDN) \times \tan(DEC \times RDN))$$

$$pp = Pi / 2 - (\text{Atn}(SOCRA / \text{Sqr}(1 - SOCRA^2)))$$

$$pp = pp / RDN$$

$$pp = 2 / 15 \times pp$$