
Pratiques culturelles et performances de la culture du blé dur en irrigué: Une approche biophysique

Farming practices and irrigated durum wheat performance: A biophysical model

Auteur 1 : Houda Mazhoud

Auteur 2 : Fraj chemak

Houda Mazhoud 1, (ORCID: 0000-0003-0892-0672, Docteur)
1Université de Carthage/ Institut National de la Recherche Agronomique de Tunis (INRAT)
Mail houdamazhouud@mail.com

Fraj chemak 2, (ORCID: 0000-0002-5164-5410, Maître de Conférences)
2 Université de Carthage/ Institut National de la Recherche Agronomique de Tunis (INRAT)
Mail frajchemak@mail.com

Déclaration de divulgation : L'auteur n'a pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l'objectivité de cette étude.

Conflit d'intérêts : L'auteur ne signale aucun conflit d'intérêts.

Pour citer cet article : Mazhoud H, & Chemak F (2021) «Pratiques culturelles et performances de la culture du blé dur en irrigué: Une approche biophysique», African Scientific Journal « Volume 03, Numéro 6 » pp: 300-321.

Date de soumission : Mai 2021

Date de publication : Juin 2021



DOI : 10.5281/zenodo.5650097

Copyright © 2020 – ASJ



Résumé

En Tunisie, malgré le développement remarquable des technologies de production, les rendements du blé dur en irrigué restent toujours en dessous des attentes. Plusieurs facteurs concourent à cette faiblesse en relation avec la disponibilité en eau et les pratiques culturales. Le défi est de surmonter ses entraves pour améliorer la production et valoriser aux mieux la ressource en eau. L'objectif est d'établir un diagnostic opérationnel de l'activité du blé dur en irrigué et d'identifier des éventuels alternatives d'amélioration de ses performances. Pour répondre à cet objectif, une enquête de terrain a été conduite auprès d'un échantillon de 42 irrigants. En utilisant CROPSYST, un modèle de culture du blé dur en irrigué a été développé et des scénarios de bonnes pratiques ont été simulés. Les résultats des simulations ont montré qu'il est tout à fait possible d'accroître les rendements jusqu'à 80% du potentiel espéré avec une amélioration de la productivité de l'eau et de la rentabilité de la culture. Les résultats de ce travail ont permis d'identifier des voies plausibles d'amélioration des performances agronomiques et économiques de la culture du blé dur en irrigué. La concrétisation de ces voies nécessite une réflexion concertée de la part des acteurs pour mettre en avant des stratégies appropriées au contexte étudié.

Mots clés : Irrigation, Système cultural, Productivité, Modélisation, CROPSYST, Tunisie

Abstract

In Tunisia, despite the outstanding development of the production technologies, the achieved yields of the irrigated durum wheat are still under expectations. Several factors contribute to this weakness according to water availability and farming practices. The objective of this work is to establish an operational diagnosis of the irrigated durum wheat activity and to identify alternatives for improving its performance. In order to deal with this issue, a field survey was carried out among a sample of 42 farmers cultivating durum wheat. Using CROPSYST software, a crop model was developed and scenarios of good practices were simulated. The results of the simulations showed that it is entirely possible to increase the yields up to 80% of the expected potential with an improvement of the water productivity and the crop profitability. The results of this work have identified plausible ways to improve the agronomical and economical performances of the irrigated durum wheat crop. The concretization of these paths requires a concerted reflection between the actors to put forward suitable strategies according to the studied context.

Keywords : Irrigation, Crop system, Productivity, Modeling, CROPSYST, Tunisia

Introduction

En Tunisie, la céréaliculture demeure une activité stratégique et de premier rang à l'échelle nationale. En effet, elle couvre une superficie moyenne de l'ordre de 1375 milles hectares représentant 30 % de la superficie agricole arable du pays. Cette superficie permet de réaliser une production moyenne¹ de 17 millions de quintaux (1q=100kg) soit un rendement moyen de l'ordre de 12qha⁻¹. En raison de sa dépendance étroite des précipitations, l'activité montre une grande variabilité interannuelle avec une production qui descend jusqu'à 5 Millions de quintaux en année sèche (Chemak et al., 2018).

En vue d'atténuer cette variabilité les pouvoirs publics ont misé sur le développement de la céréaliculture irriguée. Ainsi, cette activité occupe une superficie moyenne de 80000 ha par an et assure une production moyenne² de 2,7 Millions de quintaux (DGPA, 2018). La culture du blé dur en irrigué reste la principale activité céréalière pratiquée sur une superficie moyenne de 48 700 ha (Mazhoud et al., 2020). La production moyenne atteint 1,8 Millions de quintaux soit un rendement moyen de 38 qha⁻¹. Toutefois ce rendement est bien en dessous des attentes et ne dépasse pas 45qha⁻¹ en année exceptionnelle comme la campagne 2009. En revanche, le rendement potentiel mis en évidence par les recherches agronomiques est de 70 qha⁻¹ voire plus (El Faleh et Gharbi, 2014).

Plusieurs travaux de recherche expérimentale ont été menés pour mettre en exergue l'ensemble des facteurs susceptibles d'impacter négativement les performances de la culture. En s'intéressant aux pratiques d'irrigation, des recherches ont montré qu'une mauvaise gestion en termes de dose appliquée et de calendrier d'irrigation constitue un facteur de premier rang limitant le pouvoir productif du blé dur (Zaïri et al., 2003 ; Sander et Wim, 2004 ; Hammami et al., 2017). Hammami et al. (2017) ont affirmé « *qu'il est possible d'obtenir des rendements supérieurs à 70 qha⁻¹ pour le blé dur à haut rendement avec l'adoption d'une irrigation adéquate et l'élaboration d'un bon calendrier d'irrigation* ».

D'autres travaux ont étudié également les pratiques culturales en matière d'assolement et de rotation tout en mettant en évidence l'impact négatif de la monoculture (Rajaram et Braum, 2008 ; Mouelhi et al., 2016 ; Ben Zekri, 2017). Mouelhi et al. (2016) ont affirmé que « *la monoculture du blé dur couvre plus de 70 % des emblavures céréalières en Tunisie. Cette pratique a entraîné une diminution des teneurs en matière organique des sols cultivés, leur*

¹ Selon les statistiques de la période 2000-2018.

² Selon les statistiques de la période 2000-2018.

conférant ainsi une moindre fertilité et une sensibilité accrue à la dégradation ». En analysant les systèmes céréaliers méditerranéens, Ben Zekri (2017) montre que la monoculture a fait baisser les rendements du blé dur à 45qha^{-1} contre un potentiel espéré de 60qha^{-1} .

Cependant, ces travaux, à l'échelle expérimentale, s'intéressent généralement à la variation d'un seul facteur (dose d'irrigation, calendrier d'irrigation, dose de fertilisation, rotation culturale...). Outre, les techniques d'expérimentation appliquées atteignent leurs limites dès qu'on cherche à évaluer le processus technologique dans un environnement naturel où toutes les variables s'interfèrent sous un climat non contrôlé (Henriet et al., 2013). En vue de surmonter ces limites, l'avancement remarquable des technologies informatiques a permis le développement de la modélisation biophysique qui offre la possibilité de contrôler simultanément plusieurs facteurs et de traiter des situations plus complexes (Ouda et al., 2021). Cette approche permet d'explorer une gamme plus vaste de solutions dans un intervalle de temps restreint et d'avoir accès à une diversité d'indicateurs difficilement accessibles par expérimentation (Nasrallah, 2019 ; Belhouchette, 2004). Les modèles de culture offrent ainsi un cadre pour étudier les interactions entre les différentes variables du système. En effet, ils permettent de simuler l'effet des interactions entre le climat, le type de sol et les techniques culturales sur le fonctionnement de la culture (Yin et al., 2017 ; Jones et al., 2003)

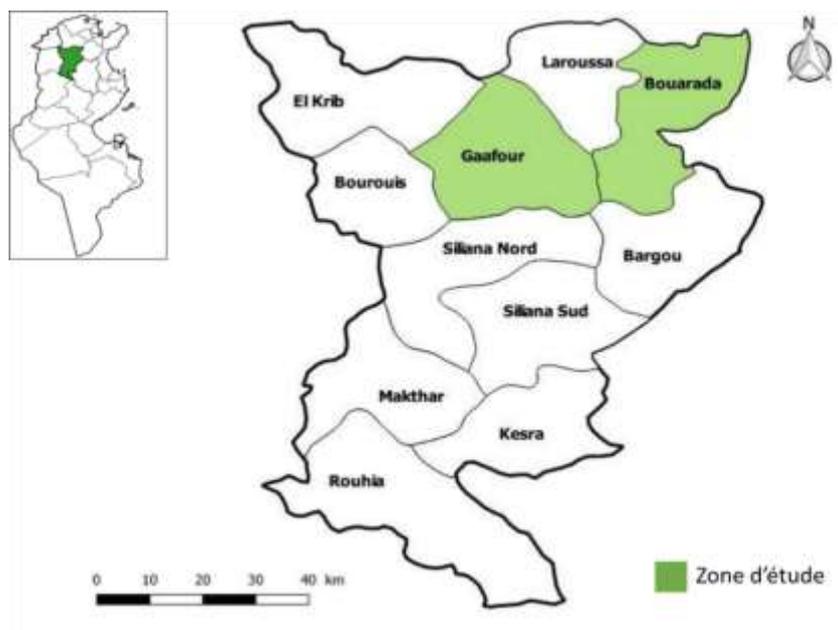
Dans cette perspective, l'objectif de ce travail est d'établir un diagnostic opérationnel de l'activité du blé dur en irrigué dans la région de Siliana et d'identifier des éventuelles alternatives d'amélioration de ses performances via le modèle CROPSYST. Pour répondre à cet objectif nous estimons que la meilleure adéquation entre les techniques culturales et les pratiques d'irrigation constitue un levier prometteur pour améliorer les performances de l'activité. Pour vérifier cette hypothèse, on présentera dans la première section le terrain de recherche et l'approche de modélisation. Dans une deuxième section, on analysera la conduite de la culture du blé dur en irrigué et on simulera des éventuels scénarios d'amélioration de performances. La troisième section sera dédiée à la discussion des résultats et leurs intérêts pour engager une réflexion concertée sur les conditions d'exercice de l'activité et les perspectives d'amélioration de ses performances. La conclusion portera sur les principales limites de ce travail et sur des éventuelles recommandations pour mettre en valeur les résultats obtenus.

1. Matériel et Méthodes

1.1. Terrain de recherche et collecte de données

En vue d'analyser les pratiques culturelles et d'évaluer les performances de la culture du blé dur en irrigué, nous avons mené nos investigations dans les périmètres publics irrigués de Gaafour et Bouarada (PPI) de la région de Siliana (Figure 1). Le climat de la région est du type semi-aride avec une pluviométrie moyenne de 408 mm (campagne 2014-2015) et une température moyenne de 22°C. Le sol est caractérisé par une texture fine avec une vocation céréalière fourragère et maraichère. Étalés sur une superficie de 3178 ha, ces deux périmètres présentent un potentiel irrigable estimé à 22% de celui de la région et assure 30% de la production totale des céréales irriguées. Le blé dur en irrigué est cultivé sur une superficie moyenne de 1432 ha représentant environ 43% des superficies céréalières irriguées (CRDA, 2018).

Figure N° 1: Location of the study area



Source : GDAM Data base (Google satellite, 2018)

En vue de collecter les données nécessaires à notre étude, nous avons opté pour une enquête de terrain avec les céréaliculteurs. Nous avons sélectionné un échantillon représentatif de 42 agriculteurs, soit 15 % du nombre total des céréaliculteurs pratiquants la culture du blé dur en irrigué dans la région de Siliana. Les enquêtes ont été conduites durant le printemps 2016 pour recueillir les données sur le fonctionnement des exploitations durant la campagne agricole 2014-2015. Le questionnaire d'enquête a été focalisé essentiellement sur la caractérisation de la structure d'exploitation (SAU, nombre de parcelle, accès à l'eau) et du fonctionnement du

système de production (occupation du sol, activité d'élevage, activité en irrigué...). Dans une perspective d'élaborer un diagnostic technico-économique de la culture du blé dur en irrigué, nous nous sommes focalisés sur les pratiques des agriculteurs en termes de conduite de la culture (travail du sol, fertilisation, irrigation, traitement, récolte) ainsi que les rendements réalisés. Nous avons aussi posé des questions quant à la perception de l'agriculteur eu égard les contraintes et les perspectives de développement de cette activité notamment en relation avec la disponibilité de la ressource en eau.

À partir des données recueillies nous avons pu mettre en forme une matrice inputs-outputs qui nous a permis d'évaluer les performances agronomiques et économiques de la culture du blé dur en irrigué en considérant un ensemble d'indicateurs relatif à l'utilisation d'intrants, les rendements escomptés, la productivité de l'eau et la marge brute de la culture.

1.2. Modélisation biophysique

1.2.1. Présentation du CROPSYST

CROPSYST (Cropping System Simulation model) a été développé au début des années 90 par le département des systèmes de génie biologique de l'Université d'Etat de Washington (Stöckle et al., 2003). C'est un modèle pluriannuel et à pas de temps journalier (Belhouchette et al., 2008). Il constitue un bon outil pour répondre aux préoccupations contemporaines par sa capacité à simuler les effets des pratiques culturales et à produire des informations pour étudier les enjeux agro-environnementaux en se basant sur l'eau, la radiation, la qualité du sol et les pratiques de fertilisation (Flichman et al., 2011 ; Jego, 2008). En effet, il permet de simuler l'eau et l'azote assimilés par le sol, la croissance des cultures et leur développement, le rendement des cultures et la production (Mlaouhi et al., 2018 ; Singh et al., 2008). Les simulations peuvent s'étaler d'une partie de l'année à plusieurs années (Chaïeb, 2011).

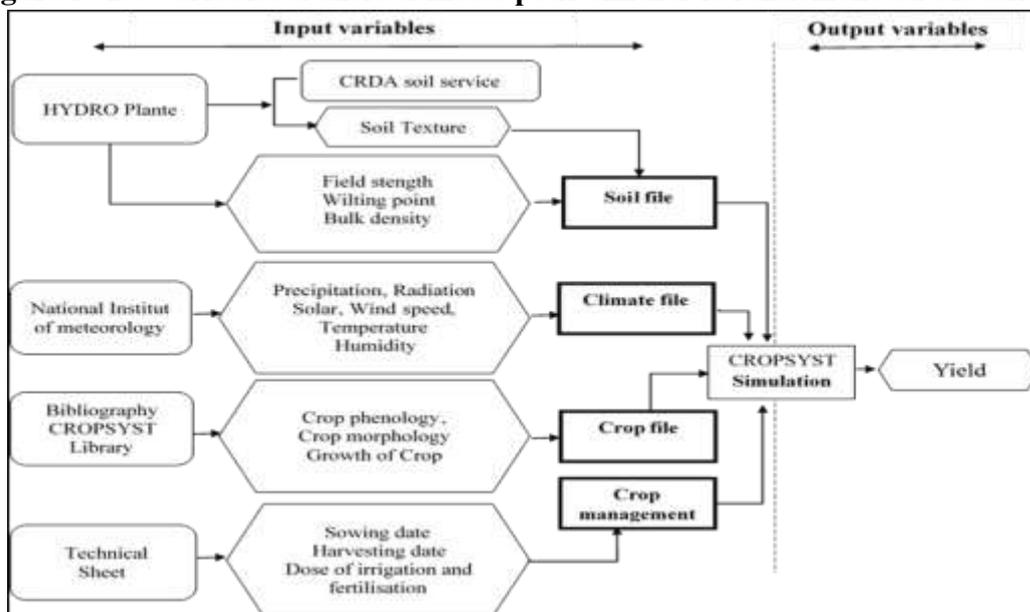
CROPSYST comprend un ensemble de variables d'état et de sortie (Belhouchette et al., 2012). Ces variables sont groupées en plusieurs modules qui décrivent la région, le climat, le sol, la plante et l'itinéraire technique (Figure 2). Le module gestion occupe une place importante au niveau de ce modèle. Il traite la conduite des cultures (irrigation, fertilisation, choix de la culture, travail du sol ...) mais aussi leurs successions au travers le sous module rotation (Schoving et al., 2019). En effet, la succession de cultures est fixée au préalable par la déclaration des dates de semis, des doses et des périodes d'irrigation ainsi que les apports de fertilisants azotés. Quand le cycle de la première culture s'achève, le sous-module rotation

remplace la première culture par une autre. Cela implique également un changement de mode de gestion (date de semis, irrigation, récolte...).

CROPSYST a été testé pour un grand nombre d'espèces cultivées à travers le monde : blé, maïs, sorgho, millet, orge, avoine, pomme de terre, tomate (Belhouchette, 2004 ; Mlaouhi et al., 2010 ; Umair et al., 2017; Nasrallah et al., 2020). Dans cette recherche, en considérant l'ensemble de ses avantages, nous avons retenu CROPSYST pour simuler les successions Blé/Blé et Pomme de terre/Blé.

En vue de simuler le rendement du blé dur, nous avons recueillis l'ensemble des données relatives à la localisation géographique de la zone, le climat, le sol, la plante et l'itinéraire technique. Ces données ont été structurées en quatre modules (Figure 2).

Figure N°2 : Variables d'entrée utilisées pour simuler le rendement du blé dur



Source : Elaboré par les auteurs

Le module climat regroupe les données journalières relatives aux précipitations, à la vitesse du vent, à la radiation solaire, à l'humidité relative et aux températures maximales et minimales. Ces données ont été collectées auprès de l'Institut National de la Météorologie (INM) de Tunis sur la période 2014-2017. Le module sol caractérise la texture du sol (% argile, % limon, % sable) avec ses caractéristiques hygrométriques (la teneur en eau à la capacité au champ, le point de flétrissement permanent). Ces données ont été collectées auprès des services compétents du Commissariat Régional de Développement Agricole (CRDA) de Siliana en se basant sur les travaux des pédologues de la société d'HYDRO Plante (Hydro plante, 2016).

En termes d'opérations culturales –travail du sol, irrigation, fertilisation, date de semis, date de récolte- (module gestion), les données ont été recueillies par enquête et validées par les techniciens experts du CRDA Siliana. Le module plante adresse les principales caractéristiques phénologiques et morphologiques de la plante que nous avons adaptées au contexte Tunisien à partir des travaux antérieurs sur la physiologie et la croissance de la culture (Nefzi, 2012).

1.2.2. Paramétrage du modèle

La calibration du CROPSYST consiste à se rapprocher de la réalité en ajustant les paramètres auxquels les résultats du modèle sont les plus sensibles (Wallach et al., 2002 ; Zongo et al., 2019). Pour cela, plusieurs travaux ont démontré que l'ajustement du coefficient de la transpiration de biomasse (K_{BT}) et l'efficacité d'utilisation du rayonnement (K_{LB}) permet un calibrage adéquat du modèle en rapprochant les rendements simulés de ceux réellement observés (Carmona et al., 2005; Komarek et al., 2017). Ces deux paramètres sont en relation direct avec l'estimation de la matière sèche totale, l'un des principaux outputs du modèle (Zongo et al., 2019). Outre, le calibrage du CROPSYST devrait être opéré par rapport à des conditions de production optimales (Belhouchette et al., 2008).

En vue de calibrer notre modèle, nous avons considéré les données relatives au fonctionnement des exploitations de la zone Gaafour. Cette zone est bien réputée par sa vocation céréalière. Elle se distingue par un climat pluvieux avec une pluviométrie moyenne de 476 mm et des terres à texture fine (CRDA, 2018).

Une fois la calibration est achevée, le modèle devrait être validé. La validation traduit la capacité du modèle à simuler effectivement des rendements observés dans des conditions réelles différentes des conditions optimales qui ont servi pour la calibration (Ouda et al., 2010; Dumont et al., 2012). Ceci implique que la validation tient compte de la variabilité spatiale et temporelle (Schoving et al., 2019).

En vue de valider le modèle, nous avons tout d'abord considéré des conduites variées de la culture du blé dur observées pendant la campagne agricole 2014-2015, chez un nombre d'exploitations représentatif (50 % du nombre total enquêté) de la zone Bouarada. Cette zone se caractérise par une pluviométrie moyenne de 342 mm et un sol peu évolué avec une texture fine (CRDA, 2016). Ensuite, pour évaluer la validité du modèle pour des années climatiques différentes (2015-2016, 2016-2017) nous avons simulé les rendements pour un ensemble d'exploitations de Gaafour et Bouarada. Ainsi, nous avons comparé les rendements moyens

simulés aux rendements moyens réalisés en se basant sur les données fournies par les services statistiques du CRDA.

En vue d'apprécier le niveau de validation du modèle, nous avons calculé le coefficient moyen de variation (RRMSE) (El Ansari,2018) . Ce coefficient est formulé comme suit :

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum (RS_i - RO_i)^2}{n}}}{\underline{RO}}$$

Avec

RO_i : Rendement observé en qha⁻¹ de l'exploitation i

RS_i : Rendement simulé en qha⁻¹ de l'exploitation i

\underline{RO} : Rendement moyen observé des n exploitations

La validation est considérée excellente si RRMSE <10%, bonne s'il est entre 10-20%, moyenne s'il est entre 20 et 30% et mauvaise s'il est supérieur à 30% (Singh et al., 2008).

2. Résultats

2.1. Analyse descriptive

Les exploitations enquêtées totalisent une superficie agricole arable de 460 ha. Les exploitants pratiquent un système cultural dominé par les cultures céréalières avec une superficie totale de 338 ha soit 74% de la superficie totale. Les autres spéculations telles que l'arboriculture, les fourrages et les cultures maraichères sont pratiquées, de manière sporadique, sur des superficies limitées. Ces exploitations sont approvisionnées en eau du barrage gérée de manière collective par un Groupement de Développement Agricole (GDA). Cette gestion collective limite l'accès à la ressource en quantité et dans le temps. La superficie conduite en irrigué s'élève à 288 ha. La superficie du blé dur s'élève à 195 ha soit 68 % du total irrigué. La totalité des agriculteurs enquêtés déclare pratiquer la monoculture sans se rendre compte de son impact négatif sur les performances de la culture (Martiniello, 2011). Ces agriculteurs évoquent plusieurs raisons pour justifier cette pratique, en particulier l'exiguïté des superficies et les risques qui accompagnent la pratique des cultures maraichères.

2.1.1. Conduite de la culture de blé dur

La superficie moyenne réservée à la culture du blé dur en irrigué s'élève à 4,6 ha par exploitation avec un minimum de 1 ha et un maximum de 20 ha. L'analyse des résultats de l'enquête a permis d'établir une fiche technicoéconomique de la culture. Cette fiche technicoéconomique a été validée par les services compétents du CRDA (Tableau1). La

conduite de la culture est totalement mécanisée. Le nombre d'heure de travail du sol s'élève en moyenne à 5 heures ha⁻¹. Le semis est réalisé à partir de mi-Novembre jusqu'à mi-Décembre avec une dose moyenne de 2qha⁻¹. La dose de fertilisation appliquée varie en fonction du stade végétatif de la plante. En effet, le DAP est fourni avant le semis avec une dose moyenne de 1,5qha⁻¹. Les apports de fertilisation azotée en termes d'épandage d'ammonitres varient de 1 à 3. En termes de quantité, les agriculteurs apportent en moyenne 3qha⁻¹. Les irrigants pratiquent l'irrigation complémentaire par aspersion. La consommation en eau moyenne est évaluée à 650m³ha⁻¹. En tenant compte de la pluie efficace³ enregistrée durant la campagne 2014-2015, cette dose d'irrigation ne permet pas de subvenir aux besoins théoriques de la culture du blé dur estimés à 3334 m³ha⁻¹ (Boughdiri et al.,2014). Plusieurs raisons sont évoquées par les agriculteurs. Tout d'abord, il faut signaler que 50% des agriculteurs enquêtés déclarent que les coupures fréquentes, dues à un réseau vétuste et défectueux, les empêchent d'effectuer des irrigations adéquates. En effet, cette situation augmente la pression sur la ressource et impose une règle de rationnement pour satisfaire, en partie, la demande. Outre, huit agriculteurs (19%), en difficultés financières, ont déclaré aussi réduire leurs consommations en eau et se contentent de deux irrigations au maximum.

Tableau N° 1 : Fiche technicoéconomique du blé dur en irrigué (campagne 2014-2015)

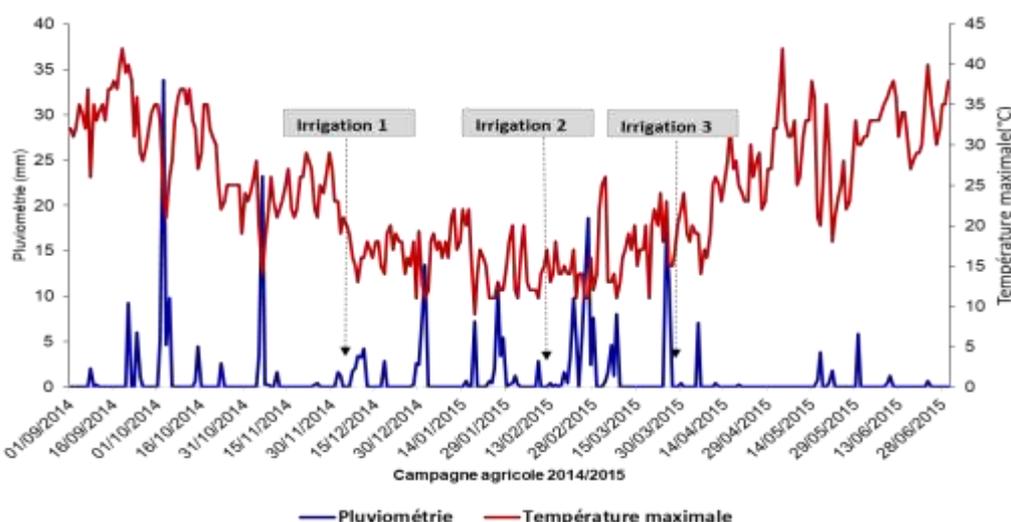
Variables	Unité	Quantité	Prix (TND)	Valeur (TND)
Semence	Qha ⁻¹	2	86	172
Travail du sol	H	5	23	115
Semis	H	1	30	30
DAP	Qha ⁻¹	1,5	47	71
Ammonitres	Qha ⁻¹	3	42	126
Traitement	TND	-	133	133
Consommation en eau	m ³ ha ⁻¹	650	0,065	42
Récolte	Hha ⁻¹	1	88	88
Pressage paille	Balle	153	0,99	151
Main d'œuvre	Jourha ⁻¹	4	10	40
Total des Dépenses	TNDha⁻¹			968
Rendement	Qha ⁻¹	36	66	2376
Paille	Balle	153	2,8	428,4
Produit brut	TNDha⁻¹			2804,4
Marge brute	TNDha⁻¹	1836,6		

Source: Nos résultats

³ «la pluie efficace est la fraction de l'eau des précipitations qui répond aux besoins en eau des cultures » elle est estimée à 60% de la pluie totale (Brouwer et Heibloem ,1987)

En moyenne les agriculteurs appliquent trois irrigations. En interrogeant ces agriculteurs sur les périodes d'application et après approbation des services compétents du CRDA, il y a lieu de signaler que la première irrigation a été effectuée après le semis (début Décembre), la deuxième a eu lieu mi-Février et la troisième a été appliquée au début du mois d'Avril. L'analyse de la conduite de ces irrigations par rapport au volume des précipitations reçues et du niveau des températures enregistrées (Figure3), montre que la troisième irrigation pourrait ne pas contribuer efficacement à la croissance de la plante (Ben Nouna et Bachtobji, 2014). Les agriculteurs justifient une telle pratique par le manque d'information et l'absence d'accompagnement de la part des services compétents du CRDA.

Figure N° 3: Calendrier d'irrigation appliqué par les irrigants



Source: Elaboré par les auteurs

2.1.2. Performances agronomiques et économiques

Les résultats de l'enquête ont montré que le rendement moyen du blé dur en irrigué réalisé pendant la campagne agricole 2014-2015 est de 36 qha⁻¹ avec un minimum de 11 qha⁻¹ enregistré à Gaafour et un maximum de 60qha⁻¹ à Bouarada. En tenant compte de la pluviométrie, la productivité de l'eau moyenne est évaluée à 7,8 kg ha⁻¹ mm⁻¹. Comparé à une moyenne de 16 kg ha⁻¹mm⁻¹ obtenu par Lasram et al. (2015) cette productivité est bien faible.

En termes de performances économiques, les résultats montrent qu'avec un prix moyen de vente de 66 TNDq⁻¹, l'activité du blé dur en irrigué offre un produit brut moyen de 2804,4 TNDha⁻¹ (1TND= 0,32 euros). Les dépenses moyennes s'élèvent à 968 TNDha⁻¹ dont 4% sont consacrées à l'irrigation. Ainsi, la culture a permis aux irrigants de réaliser une marge brute moyenne de 1836TNDha⁻¹ représentant 88%de la marge brute globale de l'exploitation (2068,7 TNDha⁻¹).

Ce résultat confirme l'importance de la culture du blé dur dans le système de production en absence d'une diversification du système cultural.

2.2. Modélisation et simulation

2.2.1. Calibrage et validation

Le modèle a été calibré en minimisant la différence entre le rendement simulé et celui observé pendant la campagne agricole 2014-2015 dans la région de Gaafour. En ajustant les coefficients (K_{BT}) et (K_{LB}), le rendement simulé atteint $34,5 \text{ qha}^{-1}$ soit une différence de 4% par rapport à celui observé (36 qha^{-1}). Par conséquent le modèle est en mesure de simuler assez correctement les rendements. En considérant 50% du nombre total des exploitations enquêtées de la Zone Bouarada, les résultats de la validation du modèle ont montré une correspondance significative entre les rendements simulés et ceux observés avec un RRMSE de 5% (Tableau 2).

Les résultats de la validation du modèle, sur les trois campagnes agricoles 2014-2015, 2015-2016 et 2016-2017, montrent également que les rendements simulés sont assez comparables à ceux réellement observés avec une différence nettement inférieure à 10 % en considérant différentes années climatiques (Tableau 3). En se référant aux travaux d'Umair (2017) et de Wang et al. (2006), nous pouvons conclure que notre modèle est bien validé et peut être utilisés pour simuler des éventuels scénarios.

Tableau N°2 : Résultats de la validation du CROPSYST dans la zone de Bouarada

Exploitations	Région	SAU Ha	Superficie blé dur Ha	Dose d'irrigation mm ha^{-1}	Rendement observé (qha^{-1})	Rendement simulé (qha^{-1})
1	Bouarada	10	10	130	40	34
2	Bouarada	20	20	150	32	35
3	Bouarada	3	3	91	27	28
4	Bouarada	10	10	129	40	38
5	Bouarada	3	3	50	35	35
6	Bouarada	10	10	80	32	30
7	Bouarada	3	2,5	75	41	37
8	Bouarada	5	3	90	37	37
9	Bouarada	3	3	50	30	27
10	Bouarada	10	6	63	45	43
11	Bouarada	2,5	2,5	35	18	20
12	Bouarada	12	8	62	48	42
Moyenne	-	-	-	-	36	34
RRMSE (%)	5					

Source: Nos résultats

Tableau N°3 : Résultats de la validation du CROPSYST sur des années climatiques différentes

Exploitations	Région	Rendements simulés (qha ⁻¹)		
		2015	2016	2017
1	Bouarada	34	32	21
2	Bouarada	35	31	28
3	Bouarada	28	31	23
4	Gaafour	34	28	24
5	Gaafour	35	32	28
Moyenne simulée	-	34	29	23
Moyenne observée	-	36	32	24
Différence (%)	-	5	8	1

Source: Nos résultats

2.2.2. Définition des scénarios

Les résultats de l'enquête montrent que les faibles performances de la culture de blé dur en irrigué peuvent être attribuées à la pratique de la monoculture, aux faibles doses d'irrigation et à la défaillance du calendrier d'irrigation. A la lumière de ces résultats, quatre scénarios ont été définis pour identifier des éventuelles alternatives susceptibles d'améliorer les performances de la culture.

-Premier scénario(S₁) : Il consiste à adopter un calendrier d'irrigation adéquate. Suivant les travaux de Ben Nouna et Bachtobji (2014), ce scénario suggère d'appliquer la troisième irrigation en mi-Mars et non le début du mois d'avril.

-Deuxième scénario(S₂): L'objectif est de subvenir aux besoins en eau de la culture en augmentant la dose d'irrigation de 25% ce qui va porter la consommation en eau à 868 m³ha⁻¹ au lieu de 650 m³ha⁻¹.

-Troisième scénario (S₃) : En vue de contourner les risques liés à la pratique des cultures maraichères et prouver l'intérêt de la diversification pour l'amélioration des performances et l'intensification du système cultural, nous allons simuler l'introduction de la culture de pomme de terre d'arrière-saison (PDTAS) comme précédent cultural. En effet, cette culture est bien pratiquée dans la région de Siliana et occupe 20% des superficies des cultures maraichères. La culture de PDTAS connaît également une expansion remarquable stimulée par le soutien

apporté par le Groupement Interprofessionnel des Légumes (GIL) qui offre des semences certifiées à un prix préférentiel et parfois à crédit. Outre cette culture est pratiquée entre les mois d'Aout et Novembre où il n'y a pas d'autres cultures concurrentes à irriguer. Les données relatives à la conduite de la culture ont été collectées auprès des services compétents du CRDA Siliana

-Quatrième scénario (S₄) : Il consiste à évaluer l'impact de la combinaison des trois scénarios précédents en supposant que l'agriculteur est en mesure de les adopter simultanément.

2.2.3. Résultats des simulations

Les simulations ont porté sur les trois campagnes agricoles 2014-2017. Ainsi les résultats de simulation sont présentés en termes de moyennes de rendement, de productivité de l'eau et de marge brute de ces trois campagnes (Tableau 4). En vue d'analyser ces résultats, nous avons recueillis, auprès du CRDA Siliana, les données statistiques relatives aux rendements et aux consommations en eau de ces trois campagnes ce qui nous a permis d'établir une situation de référence moyenne (S₀).

L'analyse des simulations montre que l'adoption d'un calendrier d'irrigation adéquate (S₁) permet aux agriculteurs de réaliser un rendement moyen de 35,4qha⁻¹ soit une augmentation de 13% par rapport à (S₀). Ceci se traduit par une augmentation de la productivité de l'eau de 14% et permet de gagner une marge brute de 1743 TNDha⁻¹ soit un accroissement de 20% par rapport à(S₀). De même l'analyse des résultats de la simulation du deuxième scénario (S₂) a révélé que l'application d'une dose d'irrigation conforme aux besoins en eau de la culture aboutit à un rendement moyen de 37,5 qha⁻¹soit un accroissement de 20%. Ce scénario montre aussi une amélioration de la productivité de l'eau comparable à celle obtenue par la simulation du scénario (S₁) mais il permet d'assurer une marge brute moyenne plus importante égale à 1868 TND ha⁻¹ soit une augmentation de 28%.

Les résultats de simulation du scénario (S₃) montrent que l'introduction de la PDTAS comme précédent cultural, a permis d'atteindre un rendement de 54 qha⁻¹, soit une amélioration de 73%. Ce scénario permet de valoriser au mieux la ressource en eau en atteignant une productivité de 13kg ha⁻¹ mm⁻¹ et de doubler la marge brute moyenne qui atteint 2970TNDha⁻¹.

Les résultats de simulation du scénario (S₄) montrent que la combinaison de l'ensemble des trois scénarios précédents permet d'atteindre le meilleur rendement et la meilleure marge brute. En effet le rendement moyen simulé atteint 56 qha⁻¹ soit un accroissement d'environ 80% permettant de porter la marge brute moyenne à 3103 TNDha⁻¹ soit un peu plus que le double de

celle gagner en situation de référence. Malgré une amélioration substantielle, ce scénario montre une valorisation de la ressource en eau moins importante que celle révélée par le scénario(S₃) en atteignant seulement 12 kg ha⁻¹ mm⁻¹

Tableau N°4 : Résultats de simulation des scénarios

Scénarios	Définition	Rendement (qha ⁻¹)	Productivité de l'eau (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	Marge brute (TND ha ⁻¹)
S₀	Situation de référence	31	7,2	1452
S₁	Adoption d'un calendrier d'irrigation adéquate	35,4	8,2	1743,05
S₂	Augmentation de la dose d'irrigation de 25%	37,5	8,2	1868,8
S₃	Introduction de la PDTAS comme précédent cultural	54	13	2970,65
S₄	Combinaison de l'ensemble des scénarios précédents (S ₁ , S ₂ , S ₃)	56	12	3103,2

Source: Nos résultats

En vue d'analyser en profondeur les résultats obtenus (tableau 4), une analyse statistique relative à la comparaison des moyennes a été réalisée moyennant le Test de Student (t) (Pineau, 2006). Les résultats (Tableau 5) montrent tout d'abord qu'il n'y a pas de différences significatives entre la situation de référence (S₀) et les deux scénarios relatifs à la mise en œuvre d'un calendrier d'irrigation adéquat (S₁) et l'application d'une dose d'irrigation conforme aux besoins en eau de la culture (S₂). En revanche les indicateurs de performances montrent bien des différences significatives avec l'adoption des scénarios S₃ et S₄. Les résultats confirment particulièrement l'impact positif et bien significatif à un seuil de 1% de l'adoption de S₄ qui est bien la combinaison des trois scénarios (S₁, S₂, S₃)

Tableau N° 5 : Comparaison des moyennes de rendement, de la productivité de l'eau et de la marge brute moyennant le Test de Student (t)

Scénarios	Rendement (qha ⁻¹)		Productivité de l'eau (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)		Marge brute (TND ha ⁻¹)	
	Erreur standard moyenne	(t)	Erreur standard moyenne	(t)	Erreur standard moyenne	(t)
S ₀ - S ₁	7,937	-0,504	2,028	-0,658	503,674	-0,582
S ₀ - S ₂	6,437	-0,984	1,558	-0,779	400,184	-1,046
S ₀ - S ₃	2,645	- 8,693** *	1,202	-5,270**	139,080	-10,92***
S ₀ - S ₄	1,452	- 16,97** *	,577	-8,660***	42,011	-39,37***

*** Significative à 1% ; **Significative à 5% ; *Significative à 10 %

Source: Nos résultats

Discussion

Le constat de la mise en culture du blé dur en irrigué dans les périmètres de Gaafour et Bouarada témoigne de la problématique de faible performance du secteur céréalier en irrigué particulièrement en termes de rendement et de valorisation de la ressource en eau. Le diagnostic opérationnel de la conduite de la culture a permis de mettre en évidence des défaillances de pratiques culturales en relation avec la capacité financière et le savoir-faire de l'agriculteur mais aussi qui peuvent aller au-delà de sa volonté comme la limitation d'accès à la ressource et le manque d'accompagnement technique. Le développement du modèle de culture et les résultats de simulation des scénarios permettent d'éclairer aussi bien les agriculteurs que les décideurs sur des éventuelles alternatives de bonne conduite de la culture du blé. La pertinence de cette approche de modélisation biophysique réside dans sa capacité à reproduire, avec une certaine fiabilité, le processus de production et de pouvoir contrôler plusieurs variables simultanément (Mlaouhi et al., 2018). Particulièrement, CROPSYST a permis de simuler ce processus tout en

tenant compte d'une évolution réelle des années climatiques 2014-2017 et d'apprécier les résultats de simulation par rapport à une situation de référence bien observée.

Dans cette perspective, les résultats de notre recherche montrent que la problématique de disponibilité de l'eau d'irrigation ne constitue pas, à elle seule, un frein à l'amélioration des performances de la culture du blé dur en irrigué. En effet, sans accroître la dose d'irrigation, il est possible d'accroître le rendement et d'améliorer la productivité de l'eau via l'application adéquate d'un calendrier d'irrigation (Ben Nouna et Bachtobji., 2014). La diversification du système cultural, par l'introduction d'un précédent cultural comme la PDTAS, montre aussi une amélioration importante des performances sans augmenter, pour autant, la dose d'irrigation (Lasram et al., 2014 ; Ben Zekri, 2017). Cependant, ce dernier scénario suppose la disponibilité de la ressource en eau pour satisfaire les besoins de la PDTAS. Ainsi la disposition d'une main d'eau suffisante en quantité et dans le temps offre une plus grande marge pour améliorer les performances de la culture. Dans ce cas les trois scénarios (S₂, S₃, S₄) sont bien plausibles avec un impact positif certain en termes d'accroissement du rendement, d'amélioration de la productivité de l'eau et de la rentabilité de la culture. La résolution de la problématique de disponibilité de l'eau d'irrigation offre donc l'opportunité aux acteurs (CRDA, GDA, agriculteurs) de débattre les conditions de mise en œuvre du scénario S₄ comme meilleure alternative pour accroître la production du blé dur tout en garantissant à l'agriculteur les meilleurs gains.

Conclusion

Cette étude a permis d'établir un diagnostic opérationnel de conduite de la culture du blé dur en irrigué dans les périmètres irrigués de la région de Siliana. En se basant sur des enquêtes de terrain, nous avons mis en évidence des défaillances de pratiques culturales (monoculture, faible dose d'irrigation, inadéquation du calendrier d'irrigation) susceptibles d'impacter négativement les performances agronomiques et économiques de l'activité agricole et particulièrement celle de la culture du blé dur qui sont bien en dessous des attentes.

Le développement d'un modèle de culture du blé dur en irrigué, via CROPSYST, a permis d'identifier des voies plausibles d'amélioration de ses performances. Ces voies touchent à (i) la satisfaction des besoins en eau de la culture, (ii) la maîtrise de l'irrigation et particulièrement l'application d'un calendrier adéquate en tenant compte des données hygrométrique du sol et (iii) la diversification du système cultural. La concrétisation de ces voies nécessite une réflexion concertée de la part des principaux acteurs (CRDA, GDA et agriculteurs) pour mettre en avant des stratégies appropriés de réhabilitation de ces périmètres, de gestion rationnelle de la ressource en eau, d'accompagnement technique des agriculteurs et d'incitation à la diversification du système cultural.

BIBLIOGRAPHIE

- Belhouchette, H., Blanco, M., Wéry, J. & Flichman, G. (2012). Sustainability of irrigated farming systems in a Tunisian region: A recursive stochastic programming analysis. *Computers and Electronics in Agriculture. Life Sciences [q-bio] Journal articles*, 86, pp.100-110.
- Belhouchette, H., Braudeau, E., Hachicha, M., Donatelli, M., Mohtar, R., et al. (2008). Integrating spatial soil organization data with a regional agricultural management simulation model : a case study in northern Tunisia. *Transactions of the ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51 (2), pp. 1099-1109.
- Belhouchette, H. (2004). Evaluation de la durabilité de successions culturales à l'échelle d'un périmètre irrigué en Tunisie : utilisation conjointe d'un modèle de culture (CROPSYST), d'un SIG et d'un modèle bioéconomique. *Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques : ENSA, Montpellier (France)*, pp 162.
- Ben Nouna, B. & Bachtobji, M. (2014). Développement des calendriers d'irrigation pour la conduite du blé dur dans les conditions semi-arides et arides de la Tunisie. *Acte de la journée nationale sur la valorisation des résultats de la recherche dans le domaine des grandes cultures*, 17 avril 2014, pp. 27-32.
- Ben Zekri, Y. (2017). Analyse des compromis entre la production et l'efficacité de l'eau et de l'azote dans les systèmes céréaliers méditerranéens à base de blé dur. *Thèse de doctorat en Sciences agricoles : Montpellier SupAgro (France)*, pp.167.
- Boughdiri, A., Ben Nouna, B., Hammami, M., Daghari, H. & Saidi A. (2014). Modélisation des besoins en eau du blé et effet de l'irrigation de complément dans les régions semi-arides de la Tunisie. *Actes des 17èmes journées scientifiques de l'INGREF : Gestion durable des ressources en eaux et en sol : Situation, défis et perspectives, 19-20 novembre 2013, Hammamet, Tunisie. Annales de l'INGREF*, 19, pp. 204-215.
- Brouwer, C. & Heibloem, M. (1987). Les besoins en eaux d'irrigation, *Gestion des eaux en irrigation, Manuel de formation n°3*, Ed. Française, FAO, Rome.
- Carmona, G., Le Grusse, Ph., Le Bars, M., Belhouchette, H. & Attonaty, J.M. (2005). Construction participative d'un modèle d'aide à la gestion collective de la ressource en eau. Application au cas du Bassin Aveyron-Lère. *Symposium INRA : Territoires et enjeux du développement régional. 9-11 mars 2005. France : Lyon*.
- Chaïeb, R. (2011). Impacts du bilan de santé de la PAC sur le secteur des grandes cultures : une

- analyse bioéconomique en Midi-Pyrénées. *Master of Science, n. 112*. Montpellier (France) : CIHEAM-IAMM, pp.83.
- Chemak, F., Mazhoud, H., Abdelhafidh, H., Albouchi, L. & Snoussi, Y. (2018). Technical performance and water productivity analysis of the irrigated durum wheat activity. *Journal of new sciences, agriculture and biotechnology*, 50, pp. 3106-3116.
- CRDA, (2018). Siliana en chiffre. Rapport d'activité 2018, pp. 144.
- DGPA (Direction Générale de la Production Agricole), (2018). Annuaire des statistiques agricoles en Tunisie. Tunis, Tunisie.
- Dumont, B., Vancutsem, F., Seutin, B., Bodson, B., Destain, J.P. & Destain, M.F. (2012). Simulation de la croissance du blé à l'aide de modèles écophysologiques : synthèse bibliographique des méthodes, potentialités et limitations. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 16, pp.382-392.
- El Ansari, L. (2018). Analyse et performance de la diversité agricole et des stratégies pour promouvoir les systèmes de production à base de céréales au niveau des zones arides : Cas de la plaine du Saïa au Maroc. *Thèse de doctorat en Sciences agricoles*. Montpellier Sup Agro : France, pp.170.
- El Faleh, M. & Gharbi, M.S. (2014). Les céréales en Tunisie : Historique et contraintes de développement de la céréaliculture et perspective : *Journée Nationale sur la valorisation des résultats de la recherche dans le domaine de grande culture Tunis, 17 avril 2014 Tunisie. Annale de l'INRAT*, pp. 1-7.
- Flichman, G., Louhichi, K. & Boisson, J.M. (2011). Modelling the relationship between agriculture and the environment using bio-économic models : Some conceptual issues bio-economic models applied to agricultural systems. In : *Flichman G. (ed). Bio-economic models applied to agricultural systems. Dordrecht (Pays-Bas)*, pp.3-14.
- Hammami, R., Stanbouli, T., Frija, A., Souissi, A. & Ben Alya, A. (2017). Etude comparative de l'eau virtuelle consommée par les céréales dans les différentes zones bioclimatiques de la Tunisie. *Journal of new sciences, agriculture and biotechnology*, 43, pp. 2352-2356.
- Henriet, F. & De Proft M. (2013). Impact des successions culturales (y compris intercultures) sur l'utilisation de produits phytosanitaires. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 17, pp. 292-296.
- Hydro Plante. (2016) . Etude de réhabilitation et de remise en état du périmètre irrigué de Gaafour, gouvernorat de Siliana. Rapport générale, pp.191.

- Jego, G. (2008). Influence des activités agricoles sur la pollution nitrique des eaux souterraines. analyse par modélisation des impacts des systèmes de grande culture sur les fuites de nitrate dans les plaines alluviales. *Thèse de doctorat*. Université de Toulouse, pp. 229.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J. & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18, pp. 235-265.
- Komarek, A.M., Drogue, S., Chenoune, R., Hawkins, J., Msangi, S., Belhouchette, H. & Flichman, G. (2017). Agricultural household effects of fertilizer price changes for smallholder farmers in central Malawi. *Agricultural Systems*, 154, pp. 168-178.
- Lasram, A., Dellagi, H., Masmoudi, M.M. & Ben Mechlia, N. (2015). Productivité de l'eau du blé dur irrigué face à la variabilité climatique. *New Médit*, 1, pp. 61-66.
- Lasram, A., Masmoudi, M. & Mechlia N. (2014). Efficience technique et productivité de l'eau sur le blé dur irrigué en Tunisie. *Journée Nationale sur la valorisation des résultats de la recherche dans le domaine de grande culture Tunis, 17 avril 2014 Tunisie* :INRAT, 68-72.
- Martiniello, P. (2011). Cereal–forage rotations effect on biochemical characteristics of topsoil and productivity of the crops in Méditerranéen environment. *European Journal of Agronomy*. 4, pp. 193-204.
- Mazhoud, H., Chemak, F. & Chenoune, R. (2020). Analyse typologique et performance productive de la culture du blé dur irrigué en Tunisie. *Cah. Agric.* pp 29- 24.
- Mlaouhi, S., Nasri S. & Albouchi, L. (2018). Impact du changement climatique sur les systèmes de productions dans la région de Bizerte, Tunisie : approche bioéconomique. *Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie* . *Annales de l'INRAT*, 91, pp. 280-293.
- Mlaouhi, S., Boujelben, A., Elloumi, M. & Hchicha, M. (2010). Simulations à long terme avec un modèle biophysique des rendements en fonction de la salinité du sol dans la basse vallée de la Medjerda. *Annales de l'INGREEF*, 14, pp. 1737-0515.
- Mouelhi, B., Slim, S., 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 science Agriculture and Biotechnology*, 11, pp. 1638-1648.
- Nasrallah, A., Belhouchette, H., Baghdadi, N., Mhawej, M., Darwish, T., et al. (2020).

- Performance of wheat-based cropping systems and economic risk of low relative productivity assessment in a sub-dry Mediterranean environment. *European Journal of Agronomy*, Elsevier, 113,pp. 1-15.
- Nasrallah, A. (2019). Crop mapping and yield estimation of wheat in the Bekaa plain of Lebanon. *Thèse de doctorat en Géomatique*. AgroParisTech, Montpellier (France). École doctorale ED 584 : GAIA - Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau. UMR TETIS-Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale Montpellier, pp 230.
- Nefzi, A. (2012). Evaluation économique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture : étude théorique et application au cas de la Tunisie. *Thèse de doctorat*. Economie de l'environnement et des ressources naturelles, pp. 282.
- Ouda, S., Noreldin, T., Alarcón, J.J., Ragab, R., Caruso, G., Sekara, A. & Abdelhamid, M.T. (2021). Response of Spring Wheat (*Triticum aestivum*) to Deficit Irrigation Management under the Semi-Arid Environment of Egypt: Field and Modeling Study. *Agriculture*, 11,pp. 90.
- Ouda, S.A., Khalil, F.A., El Afandi, G. & Ewis M.M. (2010). Using CropSyst model to predict barley yield under climate change conditions in Egypt : I. Model calibration and validation under current climate. *African Journal of Plant Science Biotechnology*, 4,pp. 1-5.
- Pineau, N. (2006). Les performances en analyses sensorielle, une approche base de données. *Thèse de doctorat*. Science de l'alimentation. Université de Bourgogne, pp.245.
- Rajaram, S. & Braun, H. (2008).Wheat Yield Potential. In: *Reynolds MP, Pietragalla J, and Braun HJ (ed) International Symposium on Wheat Yield Potential: Challenges to International Wheat Breeding*. Mexico, D.F. CIMMYT, pp. 103-107.
- Sander, J.Z. & Wim, G.B. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agriculture Water Management*, 69, pp. 115-133.
- Samba, A., Sarr, B., Baron, C., Goze, E., Maraux, F., Clerge, B. & Dinghaun M. (2001).La prévision agricole à l'échelle du Sahel, in: *Modélisation des agrosystèmes et aide à la décision*. Malezieux E., Trebreil G., Jaeger M. (eds). CIRAD-INRA, pp. 243-261.
- Schoving, C., Alric, F., Berger, M., Chambert, C., Champolivier, L., Clombet, C., Gras, A., Jeanson, P., Lablette, F., Marchand, D. et al. (2019). Comprendre et prédire la phénologie

- du soja pour adapter la culture à de nouveaux environnements climatiques. *Innovations Agronomiques*, 74, pp. 1-14.
- Singh, A.K., Tripathy, R., Chopra, U.K. (2008). Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water–nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95, pp. 776-786
- Stöckle, C.O., Donatelli, M. & Nelson R. (2003).CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18, pp.289–307.
- Umair, M., Shen, Y., Qi, Y., Zhang, Y., Ahmad, A., Pei, H. & Liu M. (2017). Evaluation of the Cropsyst model during wheat-maize rotations of the North China Plain for identifying soil evaporation losses.*Frontiers in Plant Science*, 8, pp. 1-14.
- Wallach, D., Goffinet, B., Bergez, J.E., Debaeke, P., Leenhardt, D. & Aubertot, J.N. (2002). The effect of parameter uncertainty on a model with adjusted parameters. *Agronomie*, 22, pp.151-170.
- Wang, Z. M., Zhang, B., Li, X. Y., Song, K. S., Liu, D.W. & Zhang S. Q. (2006). Using CropSyst to simulate spring wheat growth in black soil zone of Northeast China1. *Pedosphere*, 16,pp. 354–361.
- Yin, X., Kersebaum, K.C., Kollas, C., Manevski, K., Baby, S., Beaudoin, N., Öztürk, I., Gaiser, T., Wu, L., Hoffmann, M., Charfeddine, M., Conradt, T., Constantin, J., Ewert, F., de Cortazar-Atauri, I.G., Giglio, L., Hlavinka, P., Hoffmann, H., Launay, M., Louarn, G., Manderscheid, R., Mary, B., Mirschel, W., Nendel, C., Pacholski, A., Palosuo, T., Ripoche-Wachter, D., P. Rötter, R., Ruget, F., Sharif, B., Trnka, M., Ventrella, D., Weigel, H.J., & Olesen, J. (2017). Performance of process-based models for simulation of grain N in crop rotations across Europe. *Agric. Syst.* 154,pp. 63–77.
- Zaïri, A., Slatni, A., Mailhol, J.C., Ruelle, P. & El Amami H. (2003). L’irrigation de surface dans le contexte tunisien, perspectives d’amélioration sous différentes conditions de disponibilités en eau. *Actes du Séminaire international technologies et méthodes modernes d’irrigation : recherche,développement et essais, 14-19 Septembre 2003*,Montpellier, : AFEID.
- Zongo, B., Diarra, A., Barbier, B., Zorom, M., Karambiri, H., Ouédraogo, S., Toe, P., Hamma, Y. & Dogot, T. (2019). Évaluation ex ante de l’irrigation de complément dans un contexte sahélien : couplage d’un modèle biophysique à un modèle économique d’exploitation agricole. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 23, pp. 174-187