

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Saad Dahleb Blida 1
Faculté des Sciences de la nature et de vie
Département des biotechnologies



Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de master
Filière : science de la nature et de vie
Domaine : sciences agronomique
Spécialité : eau et environnement

Intitule

Impact des dates de semis sur la culture céréalière en utilisant Aquacrop et Instat.

Présenté par : Benyahia Khaoula.

Jury

- | | | | |
|--------------------|----------|-------------------|-------------------------|
| • Président | : | L.ZELLA | Dr. Blida 1 ENSA |
| • Promoteur | : | M.AMIROCHE | Pr,blida 1 |
| • Examineur | : | N.MIMOUNI | MAA,Blida 1 |
| • Examineur | : | N.DEGUI | MAA,Blida 1 |

Année Universitaire 2019/2020

Dédicace

C'est avec une grande gratitude et des mots sincères que je dédie ce modeste travail de fin d'étude à mes chers parents qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite.

A ma mère, source de joie pour son amour son soutien sa tendresse et ses encouragements.

A mon père pour avoir toujours cru en moi et pour ses nombreux sacrifices.

J'espère qu'un jour je pourrai leur rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que Dieu leur prête bonheur et longue vie inshallah..

Je dédie aussi de ce travail à mes chères sœurs **AHLEM** et **AYA**.

A mes chers frères **BOUALEM, MOUHAMED, SAMIR, KHALED** et **MAROUAN**.

Pour leur grande amour et soutien

Les fleurs de la maison **LOUDJAIN, YASSMINE, ABD EL HADDI, DIKRA, ABIR, LINA** et **RYM**

À mes chères copines **FADILA, HASSINA, LOUBNA ET YASSMINE**.

A tous ceux que j'aime

KHAOULA ...

Remerciement

Avant tout, je remercie **DIEU** le tout puissant pour m'avoir donné la santé, le courage et la volonté d'étudier et pour m'avoir permis de réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier chaleureusement, mon promoteur Mr **M.AMIROCHE** de m'avoir orienté par ces conseils judicieux. Pour sa patience, son aide et ses encouragements, il m'a toujours aidé à aller de l'avant.

.Je remercie vivement les membres de jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail

Monsieur **L.ZELLA**, monsieur **N.MIMOUNI** et madame **N.DEGUI**

Je remercie toute ma famille pour son soutien et ses encouragements.

Et en fin, je remercie tous mes amis et tous ceux qui ont contribué de loin ou de près a la réalisation de ce travail.

RESUME

La recherche à augmenter les rendements des cultures devient toujours une propriété en agriculture. La présente étude a pour but de déterminer les dates de semis du blé dur en vue d'augmenter les rendements et d'améliorer la productivité de l'eau, en utilisant le modèle agronomique, AquaCrop, comme outil d'aide à la décision. Des dates de semis ont été proposées qui s'adaptent à la région d'étude (Wilaya de Bordj Bou Arreridj). La méthodologie consiste à faire tourner le modèle AquaCrop sur période de 28 ans (1989-2017), tout en fixant les paramètres climatiques, les données liées au sol et les données culturales et jouant sur les dates de semis. Les résultats obtenus ont montrés que les dates ont un effet très hautement significatif sur les rendements simulés. Les rendements maximaux ont été atteints, entre 10 octobre et 10 novembre. Ils sont compris entre 5,24 et 6,91 ton/ha. Sur toutes les datés proposées (10 scénarios), le rendement maximal est atteint à la date de semis 10 octobre (6,91 ton/ha). Le modèle AquaCrop a pu simuler les dates de semis, il peut être recommandé comme un outil pratique ^pour mieux gérer les pratiques agricoles.

Mots clés : AquaCrop, Blé dur, Dates de semis, Rendement.

ABSTARCT

Research to increase crop yields becomes a property in agriculture. The purpose of this study is to determine seeding dates for durum wheat in order to increase yields and improve water productivity, using the agronomic model, AquaCrop, as a decision support tool. Seeding dates were proposed that are adapted to the study region (Wilaya of Bordj Bou Arreridj). The methodology consists in running the AquaCrop model over a period of 28 years (1989-2017), while setting the climatic parameters, soil and crop data and playing on sowing dates. The results obtained showed that the dates have a very highly significant effect on simulated yields. Maximum yields were achieved between October 10 and November 10. They ranged from 5.24 to 6.91 ton/ha. On all the proposed dates (10 scenarios), the maximum yield is reached on October 10 (6.91 ton/ha). The AquaCrop model was able to simulate seeding dates and can be recommended as a practical tool ^to better manage farming practices.

Keywords: AquaCrop, Durum wheat, seeding dates, Yield,

ملخص

اصبح البحث لزيادة غلة المحاصيل خاصة في الزراعة , الغرض من هذه الدراسة هو تحديد مواعيد بذر القمح الصلب من اجل زيادة الغلات و تحسين انتاجية المياه و ذلك باستخدام النموذج الزراعي كأداة لدعم القرار تم اقتراح مواعيد البذر الملائمة لمنطقة الدراسة (ولاية برج بوعرييج) AquaCrop على مدار 28 عام (1989-2017) مع تحديد المعلمات المناخية و AquaCrop. تمثل في تشغيل نموذج البيانات التربة و المحاصيل , واللعب في مواعيد البذر , اظهرت النتائج التي تم الحصول عليها ان المواعيد الزراعية لها تأثير معنوي كبير جدا على المحاصيل المحاكية , وقد تم تحقيق أعلى غلة بين 10 أكتوبر و 10 نوفمبر ، حيث تراوحت بين 5.24 و 6.91 طن / هكتار في جميع المواعيد المقترحة (10 سينا ريوهات) ، تم الوصول إلى الحد الأقصى للإنتاج في 10 أكتوبر (6.91 طن / هكتار) كان نموذج قادراً على محاكاة مواعيد البذر ويمكن التوصية به كأداة عملية لإدارة ممارسات الزراعة AquaCrop بشكل أفضل.

الكلمات المفتاحية : القمح الصلب, المواعيد الزراعية, المحصول. AquaCrop

Sommaire

Introduction	7
Chapitre I. Culture de blé dur	10
1. Généralité.....	10
2. Classification et origine du blé dur	10
2.1. Classification botanique	10
2.1.1. Origine génétique.....	10
2.1.2. Origine géographique	11
2.2 Description morphologique de blé dur	11
2.2.1. Le système racinaire	11
2.2.2. Le système aérien	11
2.2.3. L'appareil reproducteur	11
2.2.4. Le grain.....	12
2.3. Le cycle de développement	13
2.3.1. Période végétative	13
2.3.2. Périodes de reproduction	14
2.3.3. Période de maturation	15
2.4. Les exigences de blé dur	16
2.4.1. Les exigences édaphiques	16
2.4.2. Les exigences climatiques	16
2.5. Importance de la culture de blé dur	18
2.5.1. Dans le monde	18
2.5.2. En Algérie	18
2.6. Zones de production du blé dur en Algérie	19
3. Date de semis de blé dur.....	20
Chapitre II les modèles de culture	22
I. Concept de Base de la Modélisation	22
I.1. Historique	22
I.2. Concept de base en modélisation	23

I .2. 1. Système.....	23
I .2.2. Modèle	23
I .2. 3. Paramètres.....	24
I .2. 4. Modules.....	24
I .3. Les types des modèles de culture.....	24
I .3. 1. Les modèles de croissance.....	24
I .3. 2. les modèles agro-météorologiques.....	24
I .3. 3. Les modèles statistiques.....	25
I .3. 4. Les modèles empiriques.....	25
I .4. Les différentes phases d'évolution d'un modèle.....	25
I .4. 1. Calibrage.....	25
I .4. 2. Analyse de la sensibilité.....	25
I .4. 3. Ajustement.....	25
I .4. 4. Validation.....	26
II. Description du modèle AquaCrop.....	26
1. Le modèle AquaCrop.....	26
2. les données d'entrées.....	28
2.1. Données climatiques.....	28
2.2. Caractéristiques des cultures.....	29
2.3. Caractéristiques du sol.....	29
2.4. Pratiques de gestion.....	29
3. Les sorties du modèle.....	30
III. Le modèle Instat.....	31
CHAPITRE III. MATERIELS ET METHODES.....	32
Introduction.....	32
I. Présentation de la zone d'étude.....	32
1. Situation géographique de la wilaya de Bordj Bou Arreridj.....	32
2. Choix de la zone d'étude.....	33
3. Climatologie de la wilaya de Bordj Bou Arreridj	33

4. Relief.....	34
5. Pédologie.....	34
6. Ressources en eau.....	35
7. L'agriculture.....	35
II. Evaluation la réponse du modelé AquaCrop aux dates de semis de blé dur.....	36
1. Données climatiques.....	36
2. Données liées au sol.....	37
3. Données liées à la culture	37
Chapitre VI Résultats et discussions	38
1. Analyse des paramètres climatiques.....	38
1.1. Pluie.....	38
1.2. Températures.....	38
1.3. Humidité relative	39
1.4. Le vent.....	39
1.5. Insolation	40
2. Evaluation des dates de semis par le modelé AquaCrop.....	40
2.1. Pluie.....	41
2.2. Evapotranspiration.....	41
2.3. Evaporation.....	42
2.4. Transpiration.....	42
2.5. Besoin en eau.....	43
2.6. Biomasse	44
2.7. Indice de récolte	44
2.8. Rendement.....	45
2.9. Productivité de l'eau.....	46
3. Impact des dates de semis sur.....	47
3.1. Besoins en eaux des cultures (ETc).....	47
3.2. Biomasse	47
3.3. Indice de récolte (IR).....	48

3.4. Rendement.....	49
3.5. Productivité de l'eau.....	49
Conclusion	50

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification botanique du blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf)	10
Tableau 2 : les principaux éléments de fertilisation et leur rôle	16
Tableau 3: évolution de la superficie, production et le rendement de blé dur en Algérie (2010-2015)	17
Tableau 4: les principales wilayas productrices de blé dur en Algérie	18
Tableau5. Les paramètres de type de sol	37
Tableau 6. Paramètres physiologiques de blé dur utilisés dans le modèle AquaCrop	37

Liste des figures

Figure 1 : Le cycle de développement du blé	14
Figure.2 : interface graphique du modèle AquaCrop	27
Figure 3: Données d'entrée définissant l'environnement dans lequel la culture va se développer... ..	28
Figure.4 : Données d'entrées et sorties d'AQUACROP	31
Figure.5 : Principaux composants de l'interface Windows Instat	32
Figure 6. Carte géographiques de la wilaya de Bordj Bou Arreridj	33
Figure 7. Ressources en eau de la wilaya	35
Figure 8. Les précipitations moyennes mensuelles de la wilaya de Bordj Bou Arreridj en (mm)	38
Figure 9. Les températures moyennes maximales et minimales mensuelles de la wilaya de Bordj Bou Arreridj en (C°)	38
Figure 10. L'humidité moyenne mensuelle de la de Bordj Bou Arreridj	39
Figure 11. Vitesse moyenne mensuelle du vent de la wilaya de Bordj Bou Arreridj	39
Figure 12. L'insolation moyenne mensuelle de la wilaya de Bordj Bou Arreridj	40

Figure 13. Les pluies moyennes interannuelles, période (1989-2017)	41
Figure 14. Les variations interannuelles de l'évapotranspiration durant la période 1989-2017	41
Figure 15. Evaporation interannuelle simulée par le modèle AquaCrop, période (1989-2017)	42
Figure 16. Transpiration interannuelle simulée par le modèle AquaCrop, période (1989-2017)	42
Figure 17. Variations interannuelles des besoins en eau de blé dur simulés par le modèle AquaCrop durant la période 1989-2017	43
Figure 18. Variation interannuelle de la biomasse sèche simulée par le modèle AquaCrop durant la période d'étude (1989-2017) ...	44
Figure 19. Variations interannuelles de l'indice de récoltes simulées par le modèle AquaCrop, durant la période 1989-2017	44
Figure 20. Variations interannuelles des rendements de la culture de blé dur simulés par le modèle AquaCrop durant la période 1989-2017	45
Figure 21. Productivité de l'eau simulée par le modèle AquaCrop durant la période d'étude (1989-2017)	46
Figure 22. Les besoins en eau de la culture de blé dur en fonction des dates semis ...	47
Figure 23. La biomasse de blé dur simulée par le modèle AquaCrop en fonction les dates semis	47
Figure 24. L'indice de récolte de blé dur en fonction des dates semis	48
Figure 25. Les variations de rendement de blé dur en fonction des dates de semis	49
Figure 26. Productivité de l'eau de blé dur en fonction des dates semis	49

Introduction générale

La population mondiale ne cesse d'augmenter d'une année à l'autre. Cette croissance s'est accompagnée en toute logique, d'une augmentation importante de la demande sur les produits agricoles en général, et sur les céréales en particulier. Les céréales et leurs dérivés constituent les principales ressources alimentaires de l'humanité, en raison de leur source d'énergie et leur grande richesse en protéines. Principalement destinées à l'alimentation humaine (à hauteur de 75% de la production), les céréales assurent 15% des besoins énergétiques, elles servent également à l'alimentation animale (15% de la production) et à des usages non alimentaires. (Feillet, 2000) Depuis toujours, les céréales constituent une part importante des ressources alimentaires de l'homme et de l'animal. De plus la majeure partie de l'alimentation est fournie par les aliments en grains, dont 96% sont produits par les cultures céréalières tels que le blé, l'orge, le seigle, le riz, le maïs et le triticale...etc.

Parmi ces céréales, le blé dur, constitue la première ressource en alimentation humaine et la principale source de protéines. C'est la céréale de base de l'Afrique du Nord et du proche et moyen orient ; il fournit également une ressource privilégiée pour l'alimentation animale et de multiples applications industrielles. Le blé dur prend mondialement, la cinquième place après le blé tendre, le riz, le maïs et l'orge avec une production de plus de 30 millions de tonnes (Amokrane, 2001).

La présente recherche vise à effectuer la simulation des dates de semis sur la culture de blé dur en vue d'augmenter les rendements et d'améliorer la productivité de l'eau via un modèle de simulation nommé AquaCrop. Ce logiciel, développé par la Food and Agriculture Organization (FAO), se base sur des paramètres phénologiques et pédologiques en plus des facteurs climatiques pour modéliser la croissance des végétaux. Ce modèle a été choisi, car il combine les avantages d'être simple à manier et d'afficher des résultats complets.

AquaCrop équilibre la précision, la simplicité et la robustesse. Pour assurer sa grande applicabilité, il utilise uniquement un petit nombre de paramètres explicites et des données d'entrée principalement intuitives qui peuvent être déterminées à l'aide de méthodes simples (FAO).

Synthèse bibliographique

Chapitre I

Culture de blé dur

Chapitre .I Culture de blé dur

1.Généralité

Le blé dur est une plante herbacée, appartenant au groupe des céréales à paille qui sont caractérisée par des critères morphologiques particuliers.

2. Classification et origine du blé dur

2.1. Classification botanique

Le blé dur est une monocotylédone qui obéit à la classification détaillée est donnée par le tableau1 ci-dessous (Hennouni, 2012)

Tableau 1 : Classification botanique du blé dur (*Triticum durum* Desf)

Embranchement	Spermaphytes
S/Embranchement	Angiospermes
Classe	Monocotylédones
Super ordre	Commilini-florales
Ordre	Poales
Famille	Graminacées
Genre	<i>Triticum</i> sp
Espèce	<i>Triticum durum</i> Desf

(Hennouni, 2012)

2.1.1. Origine génétique

Le blé constitue le genre *Triticum* qui comporte de nombreuses espèces, se répartissant en trois groupes selon leur nombre de chromosomes : ALLIOUI (1993)

Le groupe Diploïde : ($2n = 14$ chromosomes) ou *triticum monococcum*

Le groupe Tétraploïde : ($2n = 28$ chromosomes) ou *triticum dicoccum* (Amidonnier), ici on trouve *Triticum durum* (blé dur).

Le groupe Héxaploïde ($2n = 42$ chromosomes) ou *triticum sativum*.

2.1.2. Origine géographique

Selon Vavilové in Erroux (1961), le blé dur a deux origines : l'Abyssinie et l'Afrique du Nord. Alors que pour Grignac (1978), le Moyen Orient est le centre générateur du blé dur, où il s'est différencié dans trois régions : le bassin occidental de la méditerranée, le sud de la Russie et le Proche Orient (Syrie et nord de la Palestine). (Hennouni, 2012).

2.2. Description morphologique de blé dur

Le blé est une plante herbacée annuelle qui produit le grain . C'est une graminée de hauteur moyenne pouvant atteindre jusqu'à 1.5m selon les variétés (Bozzini, 1988). L'appareil végétatif comprend l'appareil aérien et l'appareil racinaire (Gate et Giban, 2003).

2.2.1. Le système racinaire

Le système racinaire est de type fasciculé. En cour de développement, deux systèmes se forment :

- Le système racinaire séminal (primaire) : fonctionne de la germination au tallage.
- Le système racinaire coronaire (secondaire) : apparait au stade tallage (Moule, 1971).

2.2.2. Le système aérien

Le système aérien est formé d'un certain nombre d'unité biologique, les talles, les feuilles et les graines. La talle est formée d'une tige feuillée ou chaume portant à son extrémité une inflorescence (Clarke et al., 2002). Les feuilles se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèle et d'une extrémité pointue. Au point d'attache de la gaine de la feuille se trouve une membrane mince et transparente (ligule) comportant deux petits appendices latéraux, les oreillettes.

2.2.3. L'appareil reproducteur

Les fleurs sont groupées en inflorescences de type épi, l'épi est composé d'épillet, L'épillet est une petite grappe d'une à cinq fleurs enveloppées chacune par deux glumelles.

L'épi est constitué d'un axe appelé le rachis sur lequel sont fixés les épillets.

Le blé est une plante monoïque à fleurs parfaites, Elle se reproduit par voix sexué et par l'autofécondation (espèce autogame) (Moule, 1971).

2.2.4. Le grain

Le grain de blé est un caryopse. C'est un fruit sec indéhiscent. Il est de couleur jaune- ambrée à violacé selon l'espèce blé dur ou blé tendre et selon la variété. Il présente une partie plane (ventrale) et une partie dorsale légèrement bombée. La base élargie contient le germe et le sommet est garni de petits poils (la brosse). La partie ventrale est fendue par un sillon qui pénètre profondément dans le grain ; cependant la partie dorsale présente une arête plus ou moins prononcée (Gonde, 1986).

La coupe longitudinale révèle de l'extérieure vers l'intérieur les parties suivantes : les enveloppes, le germe et l'albumen ou amande :

✓ **Les enveloppes du fruit**

Elles représentent 14 à 16 % du poids du grain. Elles sont constituées de l'extérieur vers l'intérieur par :

- Le péricarpe : parois de l'ovaire qui comprend l'épicarpe ; le mésocarpe et l'endocarpe.
- Le tégument : enveloppe de la graine qui comprend le tégument séminal et la bande hyaline.
- L'assise protéique : qui représente 60% du poids des enveloppes et constitué de cellules à aleurones, riches en protéines (Soltner, 1987).

✓ **Le germe**

Il représente 2,5 à 3 % du grain et comprend :

Le cotylédon ou scutellum, séparé de l'amande par une assise diastasiqne destinée à la digestion future de l'albumen au profit de la plantule. - La plantule, avec sa gemmule recouverte d'un étui, la coléoptile, sa tigelle courte, et sa radicule, recouverte d'un étui, la coléorhize.

Le germe est très riche en matières grasses, matières azotées et vitamines A, E et B (Soltner, 1987).

✓ **L'albumen ou amande**

Il représente 83 à 85 % du poids du grain, est composé de 70% d'amidon et de 7% de gluten. Chez le blé dur l'albumen est corné et vitreux, un peu comme celui du riz. L'albumen joue

un rôle essentiel dans la composition de la semence ; il sert de réserve et ne sera complètement utilisé qu'au moment de la germination

2.3. Le cycle de développement

En général toutes les céréales en le même cycle de développement. Selon (Boufenar et al., 2006) le développement représente l'ensemble des modifications phénologique qui apparaissent au cours du cycle de la culture. Trois périodes repères caractérisant le développement du blé à savoir : la période végétative, reproductrice et période de maturation.

2.3.1. Période végétative

❖ Germination

La germination est l'ensemble des phénomènes par lesquels la plantule, en vie ralentie dans la graine mure, commence une vie active et se développe grâce à des réserves contenues dans cette dernière (Mazoyer, 2002).

La germination commence quand le grain a absorbé environ 25% de son poids d'eau. Les téguments se déchirent, la racine principale, couverte d'une enveloppe appelée Coleorhize, apparaît, suivie par la sortie de la première feuille, couverte d'une enveloppe appelée Coléoptile, à la surface du sol, puis apparaissent d'autres racines et feuilles. La durée de cette phase varie avec la température de 8 à 15 jours (Clement et Prat, 1970)

❖ Levé

La levée est notée quand 50% de plantules sont sorties du sol (Karou et al., 1988), et que la première feuille pointe au grand jour son limbe. Deux autres feuilles suivent (Hucl et Baker, 1998, Davidson et Chevalier, 1990). Pendant cette phase, les jeunes plantes sont sensibles au manque d'eau qui provoque une diminution de nombre (Karou et al., 1998).

❖ Tallage

Cette phase s'annonce à partir de la quatrième feuille. Le début du tallage est marqué par l'apparition de l'extrémité de la première feuille de la talle latérale primaire puis d'autres talles naissent successivement à l'aisselle des 2^{ème} et 3^{ème} feuille de la tige centrale ; l'ensemble restant court noué, formant un plateau de tallage situé juste au niveau du sol (Figure 08). Ces talles primaires peuvent ensuite émettre des talles secondaires, lesquels à leurs tours émettent des talles tertiaire (Belaid, 1986 ; Gates, 1995). La fin du tallage est celle de la fin de la période

végétative, elle marque le début de la phase reproductive, conditionnée par la photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entre nœuds (Gate, 1995).

2.3.2. Périodes de reproduction

❖ Montaison- Gonflement

Elle se manifeste à partir du stade épi à 01cm, par l'élongation du premier entrenœud. Ce stade est repérable une fois l'ébauche de l'épi du brin-maitre atteint 01cm de hauteur à partir de la couronne ou plateau de tallage (Gate, 1995). Ce stade est sensible aux basses températures variantes entre +4 et 0°C. Selon (Baldy ,1984), la montaison constitue la phase la plus critique du développement du blé. Cette phase s'achève une fois l'épi prend sa forme définitive à l'intérieur de la gaine de la feuille étendard qui gonfle. La durée de la phase est de 29 à 30 jours (Clement et Prat, 1970).

❖ Epiaison- floraison

L'épiaison est déterminée par l'apparition de l'épi hors de la gaine de la dernière feuille. Les épis dégainés fleurissent généralement entre 4 à 8 jours après l'épiaison (Bahlouli et al, 2005). Les basses températures au cours de ce stade réduisent fortement la fertilité des épis (Abbassenne et al. , 1998). Sa durée est de 16 à 17 jours (Clement et Prat, 1970).

❖ Remplissage du grain

Cette phase marque la modification du fonctionnement de la plante qui sera alors orientée vers le remplissage des grains à partir de la biomasse produite. Au début, le grain s'organise, les cellules se multiplient. Les besoins des grains sont inférieurs à ce que fournissent les parties aériennes (plus de 3/4 de la matière sèche sont stockés au niveau des tiges et des feuilles). Par la suite, les besoins augmentent et le poids des grains dans l'épi s'élève, alors que la matière sèche des parties aériennes diminue progressivement. Seulement 10% à 15% de l'amidon du grain peut provenir de réserves antérieures à la floraison (Boulelouah, 2002).

A l'issue de cette phase, 40 à 50% des réserves se sont accumulées dans le grain qui, bien qu'il ait atteint sa taille définitive, se trouve encore vert et mou, c'est le stade «grain laiteux ».L'autre partie des réserves se trouve encore dans les tiges et les feuilles qui commencent à jaunir .Les réserves du grain proviennent en faible partie de la photosynthèse nette qui persiste dans les dernières feuilles vertes. Chez les variétés tardives, cette quantité est de 12 %

contre 25 % chez les précoces. La majeure partie des réserves accumulées vient des tiges et les feuilles jaunissantes, mais non encore desséchées (Boulelouah, 2002).

2.3.3. Période de maturation

La phase de maturation succède au stade pâteux (45 % d'humidité). Elle correspond à la phase au cours de laquelle le grain va perdre progressivement son humidité en passant par divers stades (Gate, 1995). Elle débute à la fin du palier hydrique marqué par la stabilité de la teneur en eau du grain pendant 10 à 15 jours. Au-delà de cette période, le grain ne perdra que l'excès d'eau qu'il contient et passera progressivement aux stades « rayable à l'angle » (20 % d'humidité) puis, « cassant sous la dent » (15-16 % d'humidité) (Gate, 1995).

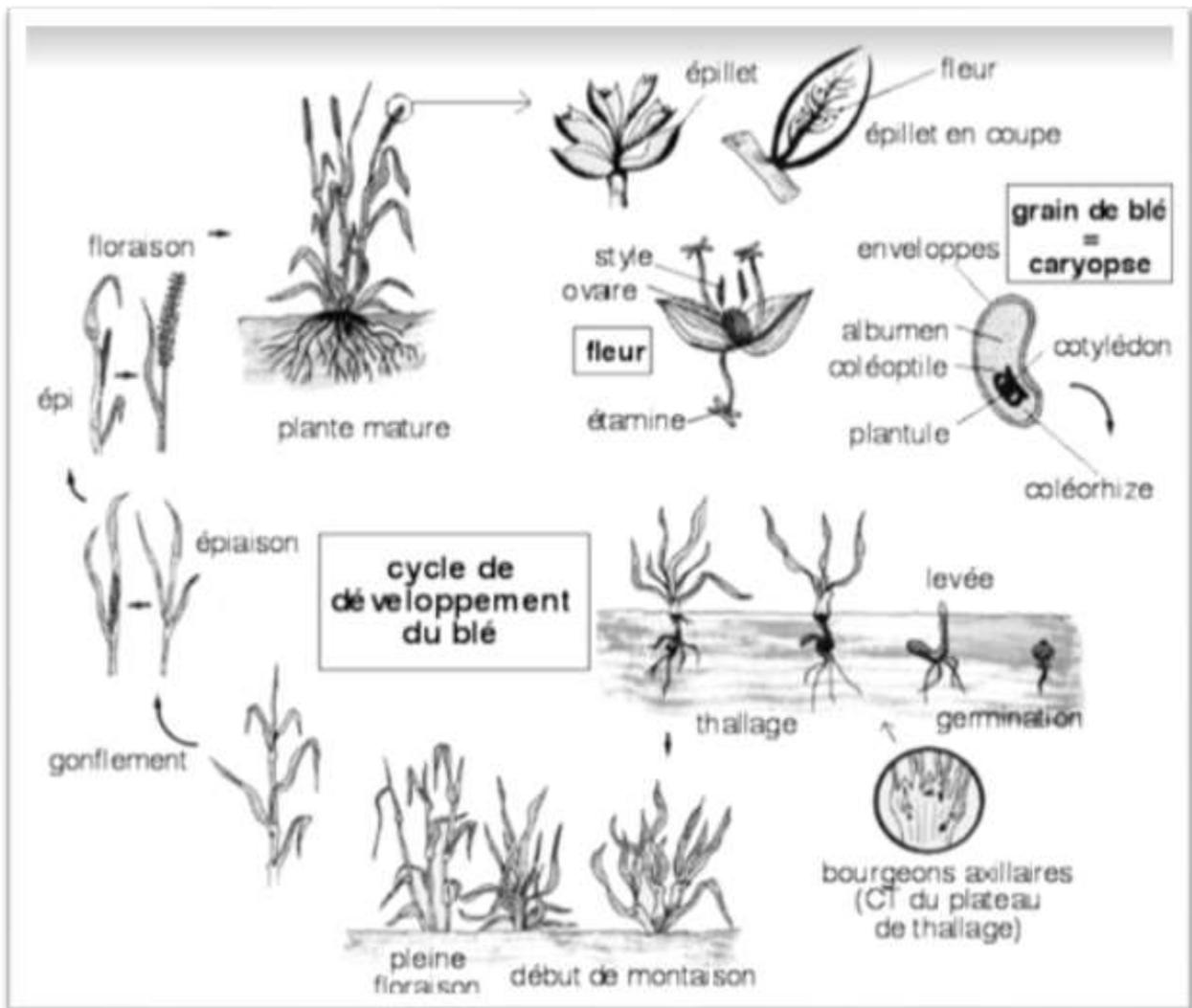


Figure 1 : Le cycle de développement du blé (Henry et De Buyser, 2000).

2.4. Les exigences de blé dur

Un bon comportement de la culture durant tout son cycle de développement exige la réunion de certains facteurs qui conduisent à l'observation d'un meilleur rendement et parmi les exigences on peut citer :

2.4.1. Les exigences édaphiques

D'après (Soltner, 2000) ; le blé dur préfère les sols du type argilo-calcaire ou limoneux à limono-argileux à cause de son système racinaire fasciculées. Les sols qui conviennent le mieux au blé dur sont :

- 1- Les sols profonds (plus de 60cm de profondeur).
- 2- Les sols suffisamment riches en matières organiques et minérales.
- 3- Les sols bien drainés pour éviter tout développement de maladies.
- 4- Les sols capables de maintenir une réserve en eau suffisant pour assurer une bonne alimentation au moment de l'accumulation des réserves dans le grain.

2.4.2. Les exigences climatiques

➤ Température

La température est l'un des facteurs importants pour la croissance et l'activité végétative. Selon (Soltner, 1988), Le blé a un zéro de végétation très bas, à 0° c, son exigence en chaleur est très élevée, pour accomplir son cycle végétatif, il lui faut un cumul de température total de 2300°c, qui se répartissant comme suite :

- ✓ Semi-germination 150° c
- ✓ Germination- tallage 500 °c
- ✓ Tallage- floraison 85° c
- ✓ Floraison-maturation 800° c

➤ Lumière

La lumière est le facteur qui agit directement sur le bon fonctionnement de la photosynthèse et le comportement du blé (Benasseur,2003). Selon (Soltner, 2005) ; le bon tallage est garanti, si le blé est placé dans les conditions optimales d'éclairement, dont dépendent à la fois résistance des tiges à la verse et le rendement.

➤ **L'eau**

Selon (Soltner ,1990), l'eau a une grande importance dans la croissance de la plante. En plus de l'eau de constitution des cellules et de celle qui entre dans les synthèses glucidiques catalysées par la chlorophylle, l'eau est le véhicule des éléments minéraux solubles de la sève brute.

A cet égard, (Clément et Parts ,1970) voient qu'il est intéressant de définir le coefficient de transpiration du blé, c'est-à-dire la quantité d'eau qui doit traverser la plante pour l'élaboration d'une certaine quantité de matière sèche. Pour le blé, suivant les variétés, la valeur du coefficient de transpiration varie de 450 à 550 grammes d'eau pour un gramme de matière sèche.

➤ **Fertilisation**

La fertilisation est raisonnée sur le principe de la restitution au sol des quantités d'éléments (N, P, K) fertilisants prélevés par les récoltes. Le blé a besoin de ces trois éléments essentiels et le rôle de chaque élément sur le plan de blé présenté dans le tableau 2 suivant (Hacini ,2014).

Tableau 2 : les principaux éléments de fertilisation et leur rôle. (Hacini ., 2014).

Les éléments	Le rôle
L'azote	<p>C'est un facteur déterminant du rendement.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Il permet la multiplication et l'élongation des feuilles et des tiges. -Il a pour rôle l'augmentation de la masse végétative
Phosphore(P)	<p>C'est un facteur de croissance qui favorise le développement des racines en cours de végétation.</p> <ul style="list-style-type: none"> - C'est un facteur de précocité qui favorise la maturation. - Il accroît la résistance au froid et aux maladies. - C'est un facteur de qualité
Potassium(K)	<ul style="list-style-type: none"> -Il régule les fonctions vitales de la croissance végétale. -Il est nécessaire à l'efficacité de la fumure azotée. -Il permet une économie d'eau dans les tissus de la plante. -Il assure une meilleure résistance à la verse et aux maladies

2.5. Importance de la culture de blé dur

2.5.1. Dans le monde

Dans le monde, l'union européenne (principalement l'Italie, l'Espagne et la Grèce) est le plus grand producteur de blé dur, avec une récolte annuelle moyenne de huit millions de tonnes métriques (Mouellef, 2010). Le Canada arrive au deuxième rang avec 4,6 millions de tonnes métriques par année, suivi de la Turquie et des Etats-Unis, avec respectivement 4 et 3,5 millions de tonnes métriques (Anonyme, 2008).

De point de vue importance alimentaire, les céréales occupent une place de choix parmi toutes les autres spéculations car elle constitue la base alimentaire qui fournit l'essentiel des apports énergétique et protéiques. En effet, le blé a l'avantage de fournir en abondance des calories sous la forme la moins coûteuse qui soit un kilo de pain fournit plus de 3000 calories, 14% de protéines et de 1 à 2% de matière grasse assurant ainsi une énergie suffisante pour travailler chaque jour (Universalisé, 1998 citer par Maamri et al., 2010).

2.5.2. En Algérie

En Algérie le blé dur occupe une place très importante vu la superficie consacrée. *Le tableau 3*, cité ci-dessous présente l'évolution de la superficie, de la production et le rendement de blé dur en Algérie durant la période 2010-2015. On remarque que la production durant la période 2010-2015 a passé de 20.385.000 de quintaux à 20.199.390 quintaux, soit une chute de production; ceci est expliqué par la sécheresse surtout pendant le stade de remplissage du grain et également, par les mauvaises conditions d'installation de la culture. Parmi les wilayas les plus productives, on note Tebassa, Tiaret et Sétif (Tableau 4).

Tableau 3: évolution de la superficie, production et le rendement de blé dur en Algérie (2010-2015)

Année	Superficie (ha)	Production (q/ha)	Rendement (q/ha)
2010	1, 181,774	20, 385,000	17,2
2011	1, 230,414	21, 957,900	17,8
2012	1, 342,881	24, 071,180	17,9
2013	1, 180,332	23, 323,694	19,8
2014	1, 182,127	18, 443,334	15,6
2015	1, 314,014	20, 199,390	15,4

Source : (MADR, 2017)

Tableau 4. Les principales wilayas productrices de blé dur en Algérie.

Année	Wilaya	Superficie (ha)	Production (q/ha)	Rendement (q/ha)
2011	Tébessa	105.000	556.000	05.7
	Tiaret	105.000	1.010.395	13.8
	Sétif	104.512	1.733.000	16.6
2012	Tébessa	104.512	275.000	06.9
	Tiaret	120.249	2.280.600	19.0
	Sétif	104.540	1.479.608	14.2
2013	Tébessa	91.000	141.900	21.3
	Tiaret	110.000	2.127.500	19.5
	Sétif	106.564	1.818.420	17.1
2014	Tébessa	92.000	220.400	11.8
	Tiaret	110.000	1.579.000	16.1
	Sétif	110.989	905.000	09.3
2015	Tébessa	88.000	312.000	08,0
	Tiaret	125.000	1.770.600	16,0
	Sétif	114.958	682.730	07.2

Source: (MADR; 2017)

2.6. Zones de production du blé dur en Algérie

L'aire de culture du blé dur s'étend des zones sub-littorales aux zones des hautes plaines et hauts plateaux. Ainsi, le blé dur occupe 50% des emblavures céréalières divisées en trois régimes d'humidité : humide, semi-humide et aride, dans les hautes plaines, dans les hauts plateaux et dans les zones sub-littorales ou littorales (Benbelkacem A, et al., 1995). En général, la culture du blé dur est associée aux zones semi-arides dont la pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 300- 400 mm (Srivastava J, 1984 ; Daaloul F, 1988). Elle est donc soumise à différentes contraintes abiotiques qui minimisent de façon très significative le rendement en grains (Bahlouli F, et al., 2008). Les principales zones de production en Algérie sont :

- ❖ La zone semi-aride des plaines telliennes dont la pluviométrie est comprise entre 350 et 500 mm, avec une distribution irrégulière (Constantine, Bouira, Médéa, Tlemcen, Mila, Souk Ahras, Aïn Defla, Chlef, Aïn Témouchent, Relizane, Sidi BelAbbès) ;
- ❖ La zone sub-aride des hauts-plateaux caractérisée par une faible pluviométrie (200-350 mm) et une altitude supérieures à 1.000 m (Tissemsilt, Tiaret, Sétif, Saïda, Oum El - Bouaghi, Bordj Bou Arréridj) ;
- ❖ La zone humide et sub-humide des régions littorales et sub-littorales Centre - Est du pays (Tipaza, Skikda, Guelma, ElTarf, Béjaïa, Tizi Ouzou, Annaba), dont la pluviométrie est supérieure à 600 mm et relativement bien distribuée (Benbelkacem A, 1997).

3. Date de semis de blé dur

La meilleure date de semis est la décision la plus cruciale qu'un producteur peut prendre. Des retards de semis peuvent coûter de grandes pertes à la récolte. La période idéale de semis est la première condition de réussite d'un blé (meilleur enracinement, plus d'épis plus fertiles, moins d'échaudage...). Plus on sème tôt et sur un sol bien préparé, plus on peut économiser de semences.

Epoque de semis : choisir la date optimale de semis en tenant compte des conditions climatiques de la région

La période de semis elle varie du type de la variété et la zone de culture. La période de semis optimale se situe entre mi-novembre et mi-décembre. Les variétés tardives sont semées plus tôt que les variétés précoces. Les semis sont relativement précoces en zones littorales et sub-littorales et relativement tardifs en zones des hauts-plateaux (Amrani M, 2013)

Chapitre II

Les modelés de culture

Chapitre II les modèles de culture

I. Concept de Base de la Modélisation

I.1. Historique

La modélisation est devenue un outil très utilisé dans différents domaines scientifiques et techniques. Depuis plus de 25 ans, l'utilisation des modèles en agronomie ne cesse de s'accroître permettant ainsi d'étudier les différents aspects liés à la croissance et au développement des plantes.

Les premiers modèles développés concernent la valorisation des travaux sur la photosynthèse, la respiration et la mise en relation de la biomasse accumulée et les processus instantanés (Wit et al., 1970). Par la suite, on assiste à l'appropriation de concepts existants (Monteith, 1972) et à l'émergence de nouveaux concepts (Spaeth et Sinclair, 1985) qui vont constituer un référentiel pour l'ensemble des modèles de culture.

En 1984, le premier modèle générique EPIC a été développé pour répondre à des préoccupations agro-environnementales. Il a ensuite donné naissance au modèle CROPSYST. Au début des années 1990, des modèles à vocation uniquement environnementale apparaissent tels que DAISY et PASTIS. En 1996 le nouveau modèle agronomique STICS a vu le jour (Brisson et al., 1998, 2003, 2009), qui a été développé à l'INRA d'Avignon en France.

L'école hollandaise (van Ittersum et al. 2002) a produit des modèles, dérivés de SUCROS, s'attachant à décrire précisément l'écophysiologie des cultures à des fins souvent didactiques. Les américains ont par suite, développé les modèles GOSSYM/GLICYM et CERES sur lesquels repose la famille du modèle CROPGRO développé par des chercheurs en Australie. Ces derniers ont commencé à introduire les pratiques agricoles pour se rapprocher davantage des objectifs agronomiques.

La tendance actuelle consiste en la mise au point de modèles génériques et agroenvironnementaux qui prennent en compte l'effet des pratiques agricoles. C'est le cas du modèle AQUACROP, développé au sein de la FAO (Organisation pour l'alimentation et l'Agriculture des Nations Unies), et qui est destiné à la prédiction de la production des cultures sous des conditions de stress hydrique. Il a pour but aussi de développer des capacités de mise au point de stratégies de gestion des exploitations agricoles, de rationalisation de l'utilisation des ressources en pour améliorer la productivité.

I .2. Concept de base en modélisation

Durant ces dernières décennies, le développement de l'outil informatique a joué un rôle important dans le progrès qu'a connu la recherche scientifique. C'est en particulier le cas pour l'étude des systèmes agronomiques. En effet, les modèles de fonctionnement des cultures sont des outils privilégiés pour simuler le comportement d'une culture et définir son niveau de production. Dans un objectif d'aide à la décision, ces modèles permettent d'analyser de manière systématique les conséquences d'une modification de la conduite d'une culture et d'évaluer les risques associés à de telle modification.

I .2. 1. Système

Les plantes de grandes cultures comme le blé, l'orge et le maïs sont des systèmes insérés dans un milieu hétérogène formé par le sol et l'atmosphère. Un tel système peut être regardé comme étant un ensemble d'entités, appelées parfois composantes ou éléments, en interaction dynamique (Nasro-allah, 1992). Ces systèmes dits naturels interagissent avec l'environnement par le biais d'échange d'énergie et de matière. Quand le système est d'intérêt agronomique, il est appelé : agrosystème.

I .2.2. Modèle

Le mot «modèle», correspond à la définition suivante : «Représentation mathématique visant à étudier plus aisément un phénomène (physique, biologique, social, etc.)». Dans notre cas d'étude, le phénomène sera remplacé par l'agrosystème. En effet, la prétention des modèles de culture est de représenter un ensemble de phénomènes physiques et biologiques caractérisant le fonctionnement du système cultural. D'après la définition de (Bonhomme et al., 1995), un modèle de croissance d'une culture est un ensemble de relations mathématiques qui permet de rendre compte, de façon simplifiée, du fonctionnement d'une culture donnée.

Un modèle est composé d'un ensemble de variables et de paramètres d'entrée, d'un ensemble de variables de sortie, et d'un ensemble de fonctions et de variables faisant le lien entre les deux.

I.2.3. Paramètres

Ce sont les grandeurs servant à décrire le phénomène modélisé. Quand l'objet de l'étude est fixé, les paramètres peuvent être changés jusqu'à l'obtention des valeurs optimales caractéristiques qui entrent dans l'élaboration d'un ensemble.

I.2.4. Modules

Un modèle à structure modulaire est divisé en plusieurs modules ou sous programmes qui communiquent entre eux. Dans un tel cas, les variables d'entrée du modèle peuvent ne pas agir sur tous les modules, mais seulement sur ceux qui leurs correspondent. Aussi, les variables de sorties sont propres à chaque module et leurs valeurs sont directement influencées par les valeurs renseignées en entrées. Les modèles de simulation de grandes cultures sont souvent organisés en quatre modules (Gate, 1995).

I.3. Les types des modèles de culture

Les modèles de culture peuvent être classés comme suit :

I.3.1. Les modèles de croissance

Ils comprennent des représentations mathématiques simplifiées de mécanismes physiques, chimiques et physiologiques complexes en relation avec la croissance de la plante. Ils sont principalement utilisés dans des applications de la recherche, mais ne sont pas très pratiques pour les applications agricoles, vu leur complexité et la nécessité de nombreux paramètres d'entrée (Richie, 1998).

I.3.2. les modèles agro-météorologiques

Ce sont des modèles qui fournissent une information journalière sur le déroulement de la réponse de la plante à une sélection de variables météorologiques en fonction du temps (Baier, 1979). Les modèles agro-météorologiques comptent parmi les approches simples en matière de simulation des cultures, basées sur l'utilisation des variables agro-météorologiques comme entrée clé (Hoogenboom, 2000). Leur succès dépend fortement de leur habilité à quantifier l'influence du climat, du sol et des conditions de culture dans la simulation du développement, de la croissance et du rendement de la culture (Hansen et Jones, 2000). Ils sont utilisés opérationnellement dans de nombreuses régions du monde pour le suivi de l'effet des conditions climatiques sur la croissance des cultures et pour la prévision des rendements à

une échelle régionale et continentale (Challinor et al., 2004; Hansen et al., 2004; Nemecek et al., 1996; Thornton et al., 1997; Vossen and Rijks, 1995; Yun, 2003).

I.3.3. Les modèles statistiques

Dans ces modèles, une ou plusieurs variables représentant le climat, les caractéristiques du sol ou le temps sont statistiquement ou empiriquement liées au rendement ou à d'autres paramètres cultureux (Baier, 1979; Ritchie, 1998).

I.3.4. Les modèles empiriques

Ces modèles comprennent des équations ou des relations empiriques pour représenter les différents processus complexes de la plante et leurs interactions avec l'environnement (Baier, 1979; Ritchie, 1998). Parmi les utilisations majeures des modèles de culture figurent l'amélioration de l'information concernant la croissance des plantes dans des conditions environnementales données, et la prévision de l'impact du changement climatique futur sur cette croissance. En effet ces modèles sont l'outil dominant dans les études d'impact du changement climatique sur les agrosystèmes (Gitay et al., 2001; Easterling et al., 2007).

I.4. Les différentes phases d'évolution d'un modèle

I.4.1. Calibrage

En langage simple, le calibrage permet d'ajuster les paramètres incertains du modèle pour que, dans une situation connue d'évolution du système agronomique modélisé, les valeurs des variables d'état calculées par le modèle soit aussi proches que possible des valeurs mesurées.

I.4.2. Analyse de la sensibilité

L'analyse de sensibilité représente l'étude de la variabilité des valeurs des paramètres de sortie à la suite d'un changement effectué sur les paramètres d'entrées. Lorsque les valeurs de sortie sont stables vis-à-vis de celles de l'entrée, on peut estimer que le modèle est bien calibré

I.4.3. Ajustement

Avant d'utiliser un modèle, il faut garder à l'esprit que sa conception est fondée sur un ensemble d'hypothèses et qu'il n'a pas été forcément testé pour les conditions de travail de l'utilisateur. Les valeurs des paramètres n'étant pas universelles, il est nécessaire de les ajuster pour adapter le modèle à la situation à modéliser. De plus, le nombre de paramètres d'entrée est souvent élevé et la plupart d'entre eux ne sont pas directement mesurables (Metselaar,

1999). Le choix des paramètres à ajuster est souvent précédé d'une étude de sensibilité dont le principe consiste à estimer l'influence des valeurs des paramètres sur les variables internes ou de sortie du modèle (Saltelli et al., 1999 ; Saltelli et al., 2000). Cette étape d'ajustement est souvent appelée étalonnage ou calibration du modèle.

I.4.4. Validation

Une fois que le modèle est ajusté sur un jeu de données, sa validation consiste à l'appliquer à d'autres données pour juger la qualité de sa calibration. L'ajustement est satisfaisant si le modèle arrive à reproduire les variables d'intérêt de sortie et leurs tendances ou si les écarts entre la simulation et l'observation sont conservés. Dans le cas contraire, un réétalonnage est nécessaire.

II. Description du modèle AquaCrop

1. Le modèle AquaCrop

AquaCrop est un modèle développé par la Food and Agriculture Organisation (FAO), branche pour l'agriculture des Nations Unies. C'est un outil d'aide à la décision qui vise la planification stratégique via l'amélioration de la productivité de l'eau dans les productions agricoles (céréalière, maraichère ou fruitière). Il met en lumière la relation physiologique entre la croissance de la biomasse et le volume d'eau transpirée par les végétaux. Ainsi, la biomasse aérienne est calculée par le produit de la productivité de l'eau (Water productivity) et du volume total d'eau transpirée par la plante au cours de son développement ($\sum Tr$). Finalement, le rendement correspond au produit de cette biomasse par l'indice de récolte (partie commercialisable de la plante) (Raes et al., 2011). Ce modèle a été choisi, car il combine les avantages d'être simple à manier et d'afficher des résultats complets. Il requiert peu de données d'entrée et fournit une large série de résultats. De plus, ce modèle a été paramétré et testé pour de nombreuses cultures telles : les céréales comme l'orge (Alemie & Kebede, 2010), le blé dur (Benabdelouahab, 2015), le maïs (Oiganji, 2016) ou du maraichage comme le chou (Wellens et al., 2014) et ce, pour une large gamme de conditions climatiques. Ces études révèlent que le modèle simule de façon assez précise l'évolution de la biomasse aérienne, le rendement en grain, les mouvements et le bilan de l'eau dans le sol (Toumia et al., 2015).

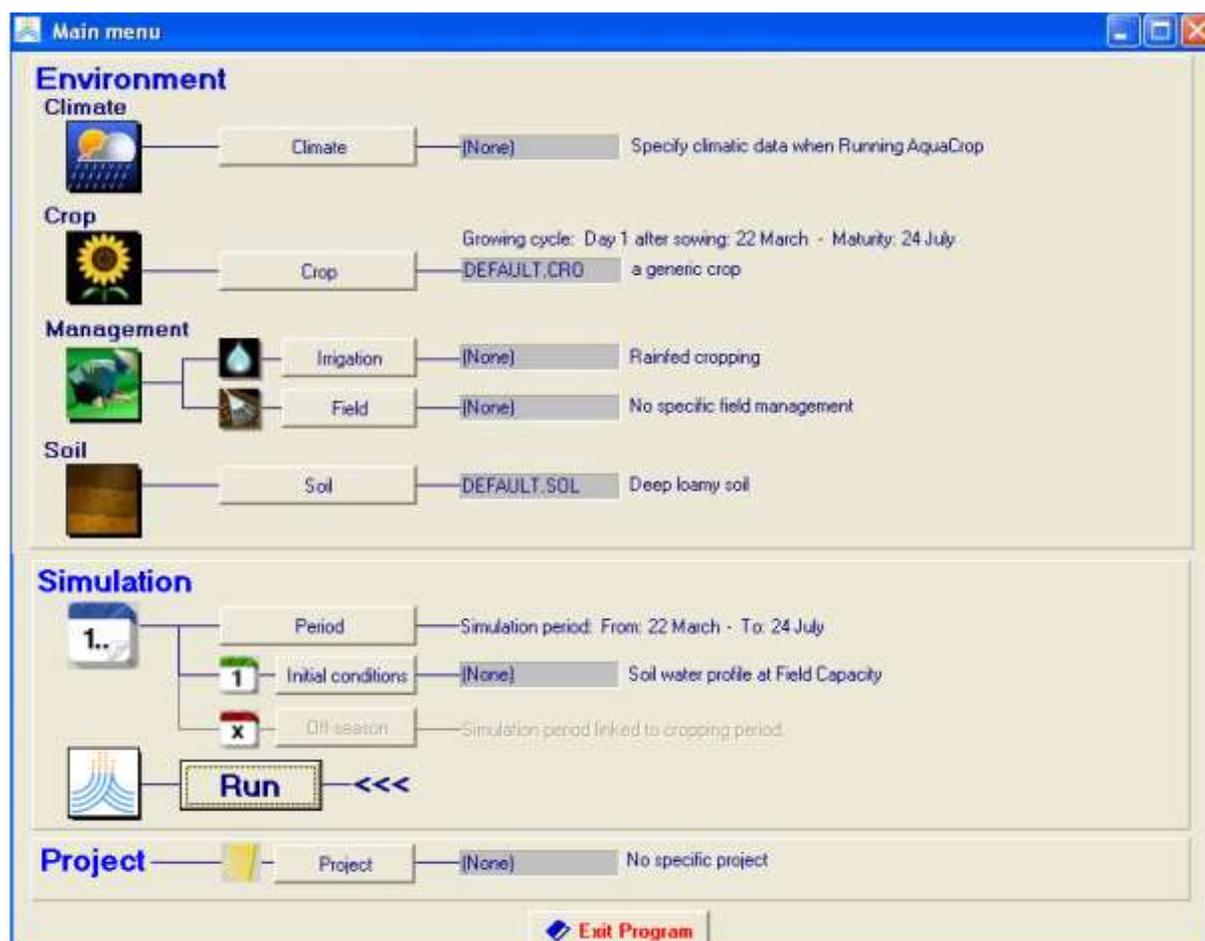


Figure 2.Interface graphique du modèle AquaCrop.

AquaCrop s'adresse aux ingénieurs-conseils, organismes gouvernementaux, ONG et associations d'utilisateurs ; il peut être utilisé comme outil de planification ou d'aide à la décision pour l'agriculture irriguée et pluviale. Le modèle est particulièrement utile :

- pour développer des stratégies d'irrigation dans des conditions de déficit en eau ;
- pour étudier l'effet sur le rendement de l'emplacement, du type de sol, de la date de semis,...
- pour étudier l'effet de différentes techniques de gestion des terres sur le rendement ;
- pour comparer le rendement réel et optimal sur une parcelle, un périmètre ou une région afin d'identifier les contraintes limitant la production de la culture et la productivité de l'eau ;
- pour prédire les impacts du changement climatique sur la production agricole ;
- pour des simulations de scénario et pour la planification par des économistes, les administrateurs et gestionnaires de l'eau (Andarzian et al., 2011).

2. les données d'entrées

Selon Raes et al.(2009), Aqua Crop utilise un nombre relativement réduit de paramètres explicites et de variables d'entrée (souvent intuitives), qui sont facilement disponibles ou qui nécessitent des méthodes simples pour leur détermination (Figure09).

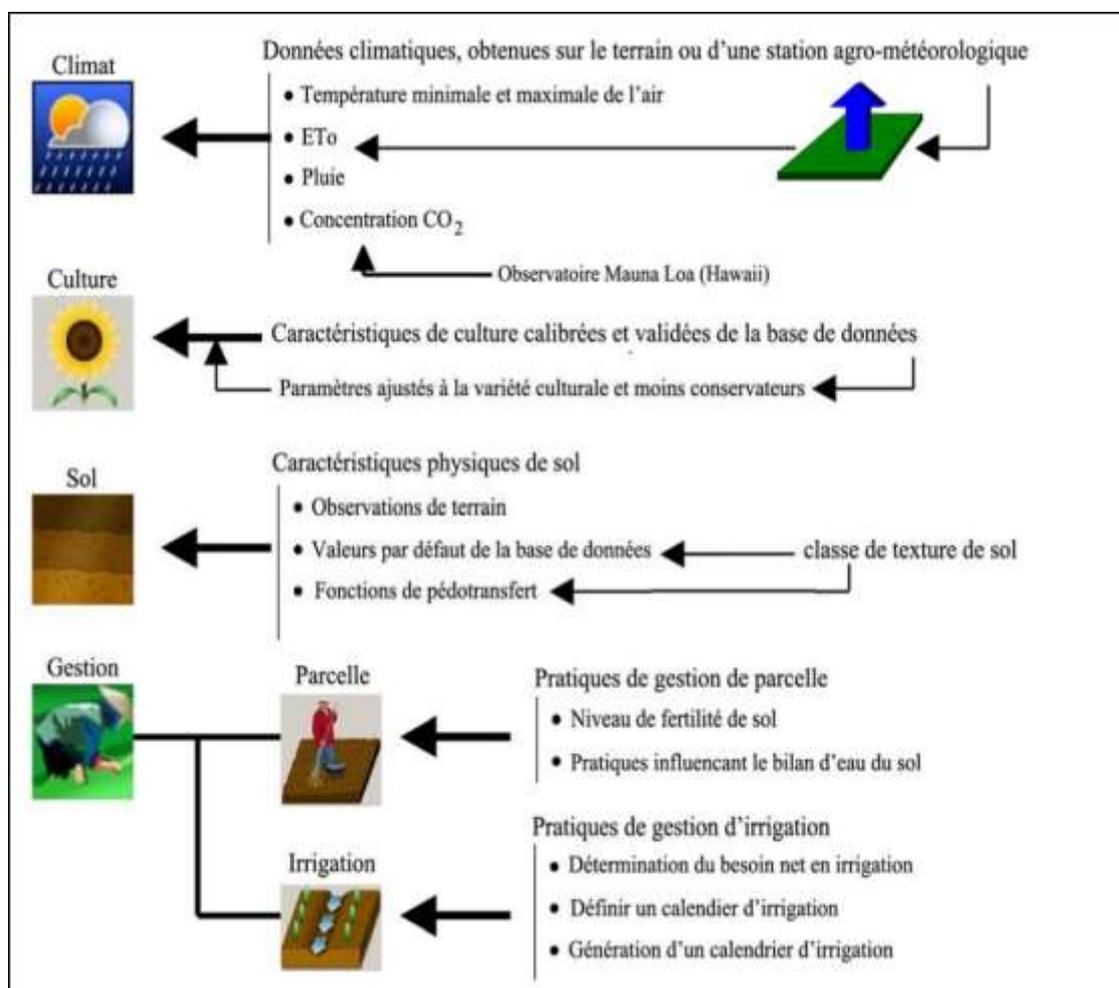


Figure 3: Données d'entrée définissant l'environnement dans lequel la culture va se développer (Raes et al., 2009).

2.1. Données climatiques

Pour chaque jour de simulation, Aqua Crop a besoin des températures minimale (Tn) et maximale (Tx) de l'air, de l'évapotranspiration de référence (ETo) comme une mesure pour la demande évaporatoire de l'atmosphère et de la pluviométrie. En plus, la concentration moyenne annuelle de CO₂ doit être connue. La température influence le développement de la culture (phénologie) ; la pluviométrie et l'ETo sont déterminants pour le calcul du bilan d'eau

de la zone racinaire, et la concentration atmosphérique de CO₂ affecte la productivité de l'eau de la culture.

2.2. Caractéristiques des cultures

Quand une culture n'est pas disponible dans la banque de données, un fichier de récolte peut être créé en spécifiant le type de cultures (fruits ou céréales, les cultures à racines et tubercules, les légumes à feuilles, ou des cultures fourragères) et la durée de son cycle de croissance. Sur la base de cette information, Aqua Crop fournit des valeurs par défaut ou les valeurs de l'échantillon pour tous les paramètres requis. En l'absence d'informations plus précises ces valeurs peuvent être utilisées.

2.3. Caractéristiques du sol

Le profil du sol peut être composé d'un maximum de cinq horizons différents de profondeur variable, chacune avec leurs propres caractéristiques physiques. Les caractéristiques hydrauliques sont considérés comme la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et la teneur en eau du sol à saturation (θ_{sat}), la capacité au champ (θ_{fc}), et au point de flétrissement permanent (θ_{PWP}). L'utilisateur peut utiliser les valeurs indicatives fournies par Aqua Crop pour différentes classes de texture du sol, ou l'importation déterminée localement ou dérivée des données de la texture du sol à l'aide de fonctions de pédo-transfert. Si une couche bloque l'expansion de la zone racine, sa profondeur dans le profil du sol doit être précisée.

2.4. Pratiques de gestion

Les pratiques de gestion sont divisées en deux catégories: la gestion des champs et les pratiques de gestion de l'irrigation:

Dans les pratiques de gestion des champs il y a des choix de niveaux de fertilité du sol et les pratiques qui affectent l'équilibre hydrique du sol comme paillage pour réduire l'évaporation du sol, diguettes en terre pour stocker l'eau sur le terrain, et les pratiques culturales telles que le buttage du sol ou contours réduisant le ruissellement de l'eau de pluie. Les taux de fécondité varient de non limitatif jusqu'à pauvres, avec des effets sur le taux de croissance de la couverture végétale, sur la couverture maximale et sur la sénescence.

Dans la gestion de l'irrigation c'est à l'utilisateur de choisir si la culture est pluviale ou irriguée. Si irriguée, l'utilisateur peut sélectionner la méthode d'application (aspersion, goutte à goutte, ou de surface), la fraction de surface mouillée, est à préciser pour chaque événement

d'irrigation, la qualité de l'eau d'irrigation, le calendrier et le montant d'irrigation appliquée. Il existe également des options pour évaluer le besoin en irrigation net et de générer des programmes d'irrigation en fonction du temps spécifié et les critères de profondeur. Étant donné que les critères pourraient changer au cours de la saison, le programme fournit les moyens de tester des stratégies d'irrigation déficitaire en appliquant des quantités d'eau choisis à divers stades de développement des cultures (Raes et al., 2009).

3. Les sorties du modèle

Dans le modèle AQUACROP, les résultats sont en pas de temps journaliers dont l'utilisateur peut suivre à travers la simulation, les effets de stress (hydrique, de température, de fertilité et de salinité) sur le développement et la production de la culture, et basculer vers plusieurs affichages, chacune des différentes séries de données de sorties, présentées dans différents dossiers. La simulation se fait en cinq étapes : d'abord la simulation du bilan du sol, puis la simulation du développement de la canopée verte (CC), et la simulation de la transpiration de la culture (Tr), ensuite la simulation de la Biomasse aérienne (B), et enfin la simulation du rendement des cultures (Y). Les résultats de simulation sont enregistrés dans des fichiers de sorties et les données peuvent être présentées en cliquant la commande du menu Simulation. Les données peuvent être regroupées en des données décadaires, mensuelles ou annuelles. Les fichiers sont enregistrés par défaut dans le répertoire OUTP d'AQUACROP. Les données de sortie des résultats journaliers consistent en 7 fichiers contenant variables clés (Manuel d'utilisation AQUACROP) :

- NomCrop.out : développement et production de la culture
- NomWabal.out : Bilan sol-eau
- NomProf.out : Teneur en eau du sol (profil et zone racinaire)
- NomSalt.out : Salinité du sol
- NomCompWC.out : teneur en eau du sol (compartiments)
- NomInet.out : besoin net d'irrigation
- NomCompEC.out : Salinité du sol (compartiments)

Cette figure suivante résume les données d'entrées et sorties du modèle :

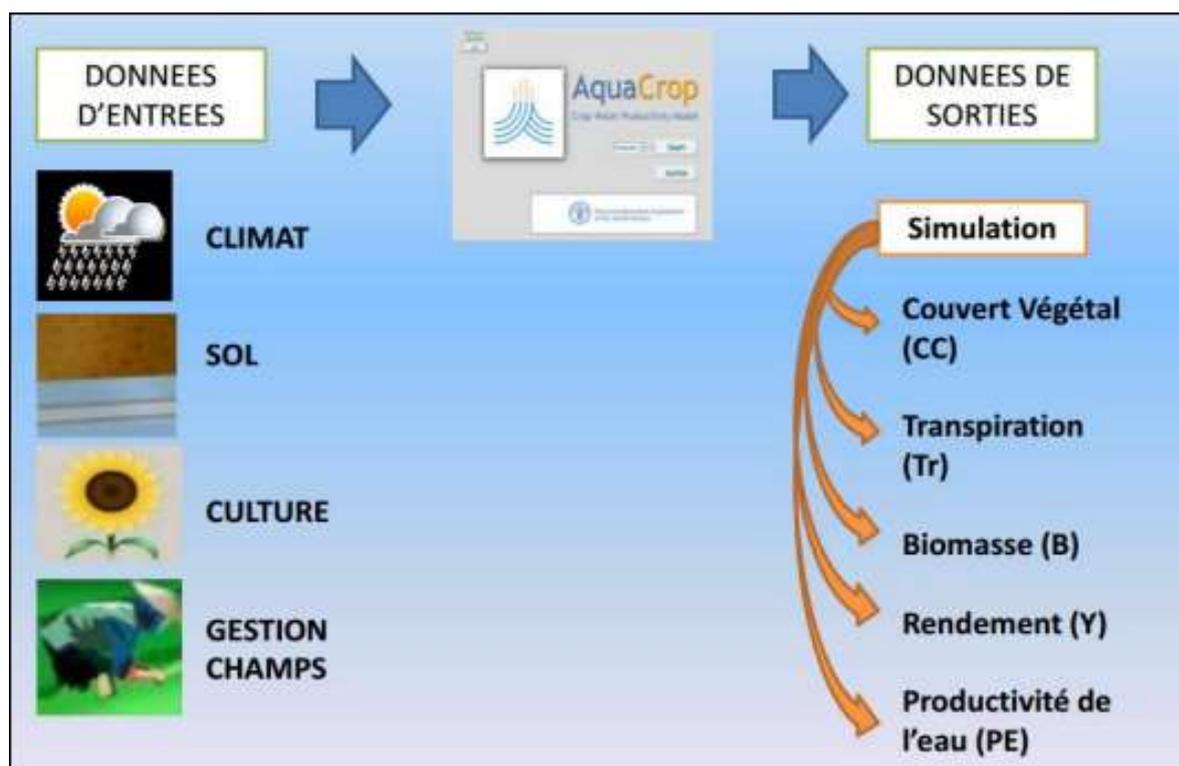


Figure.4 : Données d'entrées et sorties d'AQUACROP

(Source : Manuel d'utilisation AQUACROP)

III. Le modèle Instat

Instat est un logiciel d'analyse statistique de données agro climatiques, un modèle de simulation agro météorologique. Il ne travaille qu'avec des données numériques. Ces dernières ont été importées à partir des bases de données CLICOM.

Ce logiciel nous a permis de faire des analyses statistiques diverses des séries temporelles. En effet, à partir des données journalières utilisées, il nous a été possible d'analyser différents événements extrêmes tel que la température maximale, la température minimale, les séquences sèches, les séquences pluvieuses, les fréquences des températures maximales, pluies (Mourima Mai Moussa, 2005).

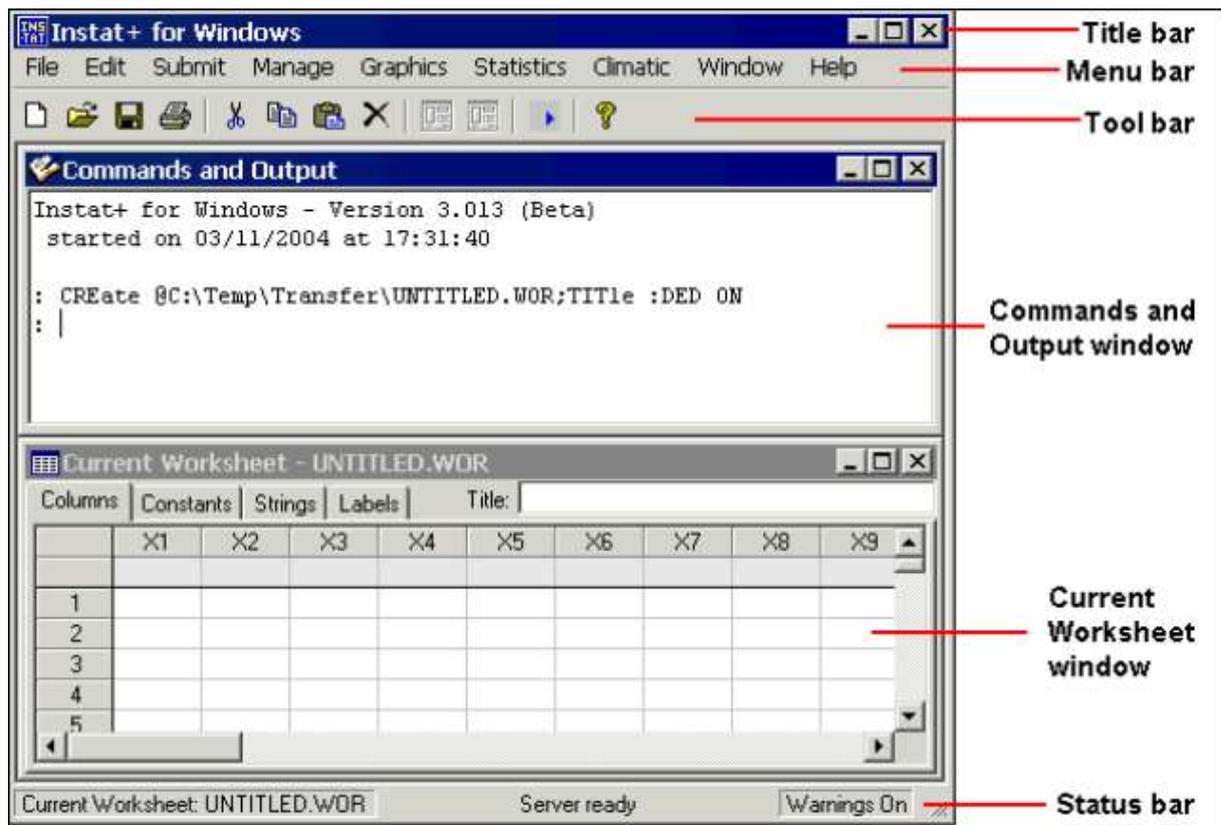


Figure.5 : Principaux composants de l'interface Windows Instat (Source : Instat Tutorial).

CHAPITRE III. MATERIELS ET METHODES

Introduction

Dans ce chapitre nous allons exposer l'ensemble des matériels et méthodes employés pour l'accomplissement de cette thèse à commencer par la description de notre site d'étude (Bordj Bou Arreridj) et du modèles de simulation du climat jusqu'aux différentes méthodes utilisées pour le traitement des résultats, tout en passant par le détail du modèle de culture et sa validation.

I. Présentation de la zone d'étude

1. Situation géographique de la wilaya de Bordj Bou Arreridj

La région de Bordj Bou Arreridj (BBA) est positionnée sur les Hauts Plateaux à cheval de la chaîne de montagne des Bibans (Debeche et al. 2013).

Géographiquement, elle est comprise entre les parallèles 35° et 37° de latitude Nord et entre les méridiens de longitude 4° et 5° à l'Est de GREENWICH. La ville de Bordj Bou Arreridj est située au point géographique 36° de latitude Nord et 4°30' de longitude Est, l'altitude varie entre 302m et 1885m (DSA, 2018)

Cette région occupant une place stratégique à mi-parcours du trajet séparant Alger de Constantine, qui s'étend sur une superficie de 3 920,42 Km², soit près de 1/600ème du territoire national, pour une population de 684.927 habitants (soit une densité : 175 habitant/km²). Elle est constituée de trois zones géographiques qui se succèdent (Mecheri, 2014). Son Chef-lieu est située à 220 km à l'est de la capitale Alger. Elle est composée de 34 communes et 10 daïras (DSA, 2018). Et est limitée :

- Au Nord, par la wilaya de Bejaia.
- A l'Est, par la wilaya de Sétif.
- A l'Ouest, par la wilaya de Bouira.
- Au Sud par la wilaya de M'Sila.



Figure 6. Carte géographiques de la wilaya de Bordj Bou Arreridj (Saunier - Associates, 2010).

2. Choix de la zone d'étude

La wilaya de bordj Bou Arreridj est considérée comme un caractère agricole et se spécialise dans la production de céréales, en particulier de blé et d'orge.

La wilaya a de grandes qualifications dans le domaine de l'agriculture à partir de terres fertiles, de complexes aquatiques inexploités et d'un climat favorable, la superficie des terres arables selon la direction des intérêts agricoles étant estimée à environ 246 154 hectares dont 87000 hectares de terres arables sont destinés à la production céréalière.

3. Climatologie de la wilaya de Bordj Bou Arreridj

La wilaya de bordj Bou Arreridj est caractérisée par un climat continental semi-aride qui affecte le climat désertique et se caractérise par un froid extrême en hiver et une chaleur élevée en été. La température moyenne annuelle est 17 °C, cependant la température maximale est 35 °C en mois de Juillet et la température minimale est 7,5 °C en mois de Janvier. (Direction d'urbanisme d'architecture et de construction, 2008).

La région d'étude se caractérise par des pluies endémiques qui conduisent à l'érosion des sols et à la formation de vallées et de récifs, ce qui caractérise la région. Le taux de précipitations annuelles varie autour 300 à 700 mm répartis sur 35 jours par an. La zone est également caractérisée par des chutes de neige dans certains cas, en particulier dans les zones montagneuses. En plus, la formation de glace en raison de la différence de température entre la nuit et le jour (Direction d'urbanisme d'architecture et de construction, 2008).

4. Relief

Le relief de la wilaya peut être décomposé en trois grandes zones :

- ✓ **La zone des hautes plaines** : Cette zone caractérisée par un relief ondulé dont les parties hautes voient affleurer le substrat marneux et les parties basses sont noyées par des alluvions et colluvions. Les hautes plaines occupent les superficies les plus importantes, avec une pluviométrie assez convenable comprise entre 400 et 600mm, sauf en période de sécheresse.
- ✓ **La zone montagneuse** : Les flyschs des montagnes du Nord sont des argiles schisteuses épaisses entrecoupées par des bancs de calcaires et de grès. L'ensemble est très sensible à l'érosion mécanique.
- ✓ **La zone steppique** : La zone Sud-Ouest est constituée de sols légers à vocation agropastorale. (DSA ,2017)

5. Pédologie

Selon Bender (2008), Au niveau de la wilaya de Bordj Bou Arreridj on peut distinguer les différents types de sol selon la zone :

- ✓ **La zone montagneuse** : Les sols relativement peu profonds argilo-limoneuse et les sols de moyennes et hautes montagnes repose sur roche mère constituée de calcaire, marno-calcaire et de grès.
- ✓ **La zone des hautes plaines** : Les sols rencontrés dans cette zone sont :
 - Sols bruns calcaires avec ou sans encroutements sur les glacis.
 - Sols vertiques.
 - Sols lithiques et sols rigosoliques
- ✓ **La zone Sud** : La couverture pédologique de la zone est une association des sols lithiques marneux.

6. Ressources en eau

La zone présente divers sources et ressources en eau de surface, elles sont estimées à 112,68 Hkm³ /an, dont 44 Hkm³ /an proviennent du barrage d'Ain Zada et des 06 cours d'eau et vallées, dont 9,4 Hkm³ /an pour la ville de Bordj Bou Arreridj, ainsi que des sources et des ressources en eaux souterraines, elles sont estimées à 39 HKm³ /an, dont 15 Hkm³ /an pour l'irrigation et 24 Hkm³ /an pour la consommation en eau potable. (saunier- associes, 2010).

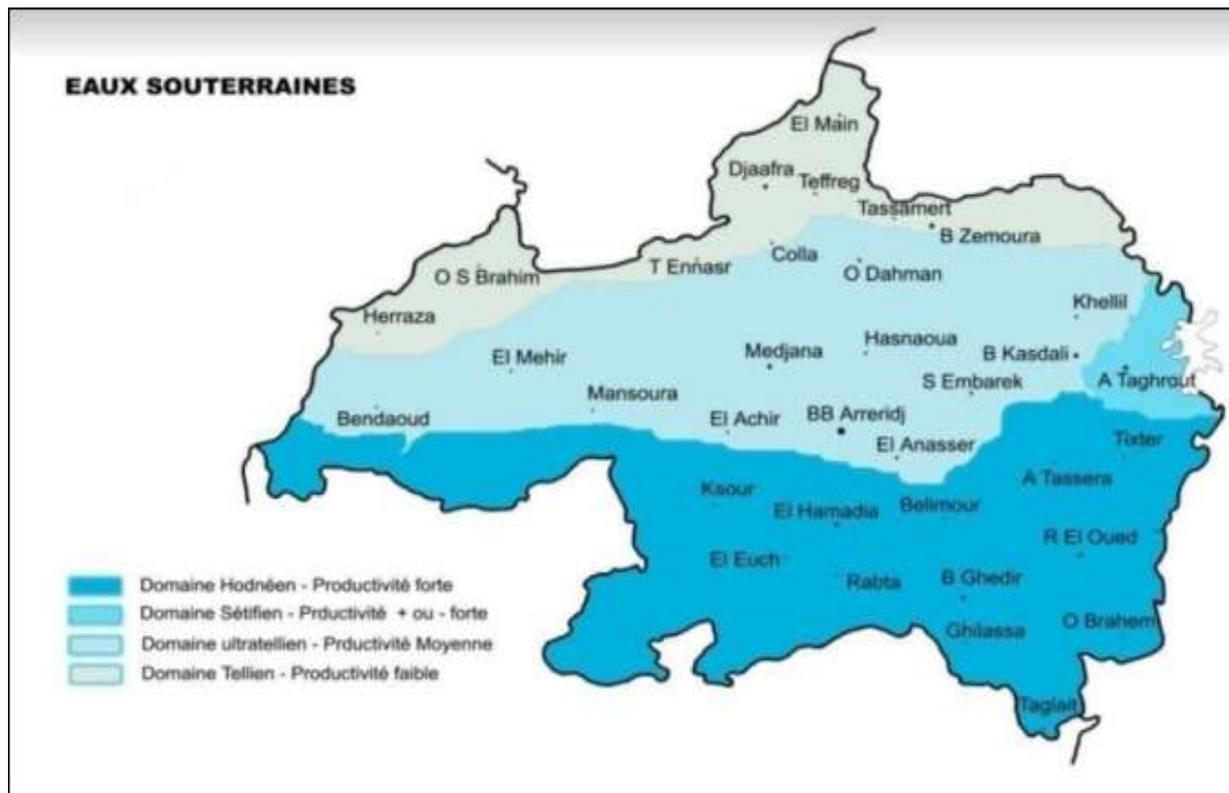


Figure 7. Ressources en eau de la wilaya. (Direction d'urbanisme d'architecture et de construction, 2008).

7. L'agriculture

La wilaya de bordj Bou Arreridj est à vocation agricole. La zone des hautes plaines est à haut rendement céréalier .au nord, la zone montagneuse des Bibans est dominée par l'arboriculture, surtout l'olivier et le figuier, la région possède de nombreuse huileries traditionnelles. Le sud-ouest est une zone steppique a vocation pastorale ou se pratique une agriculture extensive avec association céréaliculture jachère. (Andi, 2013).

II. Evaluation la réponse du modelé AquaCrop aux dates de semis de blé dur

Dans cette section, il s'agit de simuler par le modèle AquaCrop, les dates de semis de la culture de blé dur sur la wilaya de Bordj Bou Arreridj pour une période de 28 ans (1989-2017). La démarche consiste à fixer les données climatiques, les données liées au sol et les données liées à la culture, le seul paramètre qu'on change c'est les *dates de semis*.

1. Données climatiques

Les données climatiques requises par le modèle AquaCrop sont les températures minimales, maximales (°C), les précipitations (mm), la vitesse du vent (m/s) à 2 m au-dessus du sol, la radiation solaire (W /m²) et l'humidité relative (%). Ces données ont été récoltées à travers des bulletins de l'ONM et des sites météorologiques s'étalent sur une période de 28 ans (1989-2017). Les mesures prises, à un pas de temps mensuel.

L'évapotranspiration de référence ETo peut être calculée à partir des données climatiques de stations météorologiques, au moyen de l'équation de Penman-Monteith de FAO. Elle donnée comme suit :

$$ET0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u2(es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u2)}$$

- ET0 : évapotranspiration de référence journalière (mm/j) ;
- Rn : rayonnement net à la surface de culture (MJ/m²/j) ;
- G : flux de chaleur échangé avec le sol (MJ/m²/j) ;
- T : température moyenne journalière (°C) ;
- U2 : vitesse moyenne journalière du vent mesuré à 2 mètres (m/s) ;
- (es et ea) : respectivement la pression de vapeur saturante et la pression réelle de l'air à la même hauteur (kPa) ;
- Δ : Pente de courbe de pression de vapeur saturante à la température T (KPa/°C) ;
- 0,34 : coefficient de vent pour la culture de référence (kg K/KJ) résultant du rapport rs/ra ;
- 0,408 : inverse de ƞ =2,45 MJ/kg.

2. Données liées au sol

Selon Brender (2008) la texture des sols céréaliers de la wilaya de bordj Bou Arreridj c'est argilo-limoneuse, les paramètres de type de sol sont représenté dans le tableau.5 ci-dessous :

Tableau5. Les paramètres de type de sol.

Paramètres	Θ SAT	Θ FC	Θ PF	da
Valeurs	52 %	44%	23%	1.21

(Source : Manuel d'utilisation AquaCrope, version 4.0).

3. Données liées à la culture

Les déférentes données liées à la culture de blé dur sont représenté dans le tableau 6.

Tableau 6. Paramètres physiologiques de blé dur utilisés dans le modèle AquaCrop.

Paramètres	Valeurs
Température de base (°C)	0°C
Température supérieure seuil (°C)	26°C
Nombre de plantes par hectare	45000000
Méthode de plantation/semis (semis direct ou transplantation)	Semis direct
Le temps du semis à l'émergence (jours)	13jours
Moment de floraison (jours)	142 jours
Durée du stade de floraison (jours)	16 jours
Moment du début de sénescence de la canopée (jours)	158jours
Moment où la maturité est atteinte (c'est à dire la durée du cycle de Blé dur) (jours)	155jours
Densité des plantes	200 plants/m ²
Moment de l'émergence (jours)	10jours
Indice de récolte (%)	48%
Productivité de l'eau g/m ²	15g/m ²
Profondeur maximale d'enracinement(m)	1.5 m

(Source : Farouk et Mohamed, 2019).

Chapitre VI Résultats et discussions

1. Analyse des paramètres climatiques

1.1. Pluie

La figure 8 montre les précipitations moyennes mensuelles sur une période d'observation de 28 ans (1989/2017) de la wilaya de Bordj Bou Arreridj. Il est constaté que le mois le plus pluvieux est le mois septembre 62,47 mm et le mois le plus sec est juillet 11 mm.

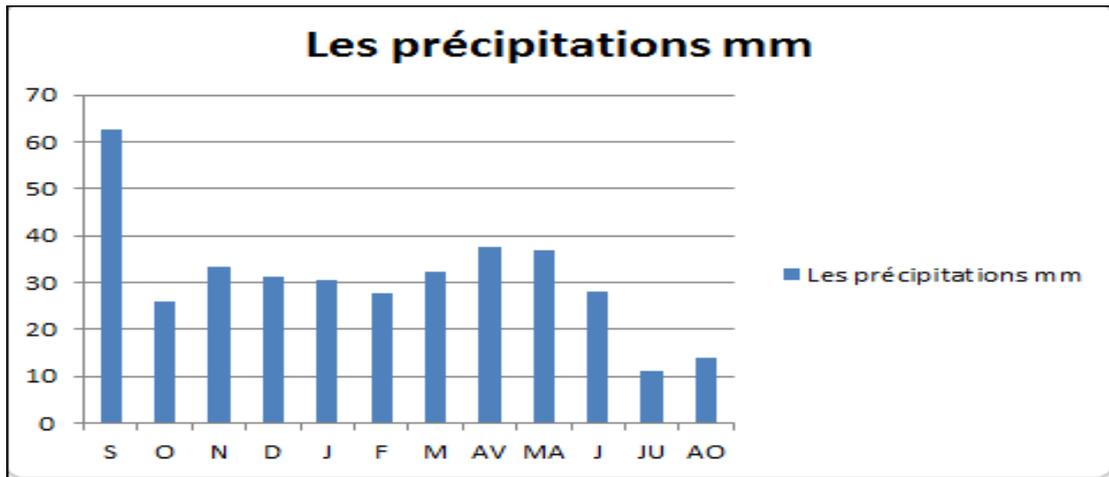


Figure 8. Les précipitations moyennes mensuelles de la wilaya de Bordj Bou Arreridj en (mm)

1.2. Températures

Les relevés moyens mensuels des températures moyennes enregistrées sur la période d'étude sont présentés dans la figure 9. D'après cette figure, il est constaté que la moyenne mensuelle du mois le plus froid est de 2,2 °C et celle du mois le plus chaud est de 28,5 °C, elle correspond, respectivement, pour le mois de janvier et aout.

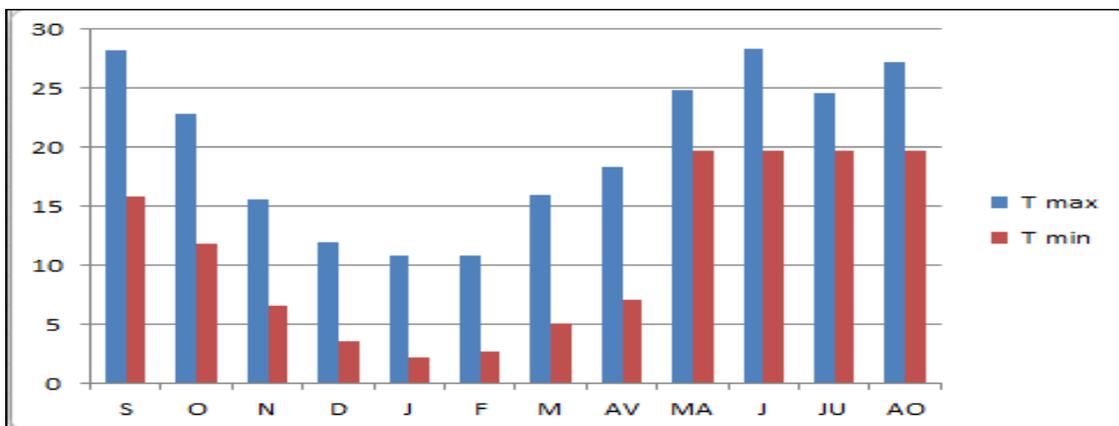


Figure 9. Les températures moyennes maximales et minimales mensuelles de la wilaya de Bordj Bou Arreridj en (C°)

1.3. Humidité relative

La figure 10 représente l'humidité moyenne mensuelle de la wilaya de Bordj Bou Arreridj une période d'observation de 28 ans (1989/2018). Il est constaté que le mois le plus humide est le mois décembre avec 72,81 %, par contre le mois le moins humide est le mois aout avec 39,44 % .

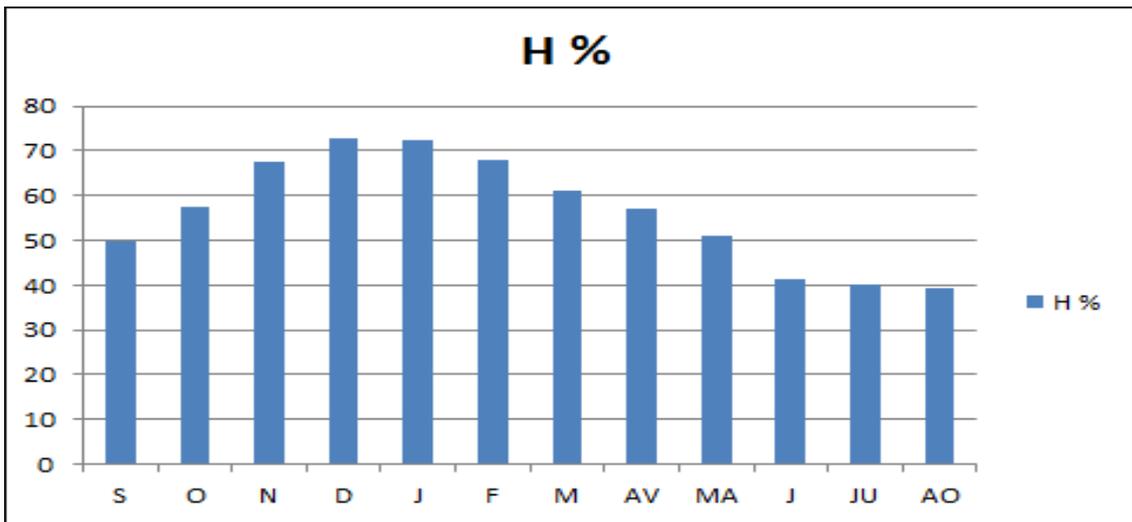


Figure 10. L'humidité moyenne mensuelle de la de Bordj Bou Arreridj.

1.4. Le vent

La figure 11 montre les tendances de la vitesse du vent, elle représente la vitesse moyenne maximale du vent en aout (2,85 m/s), et la vitesse minimale, vitesse observée en novembre (2,5 m/s).

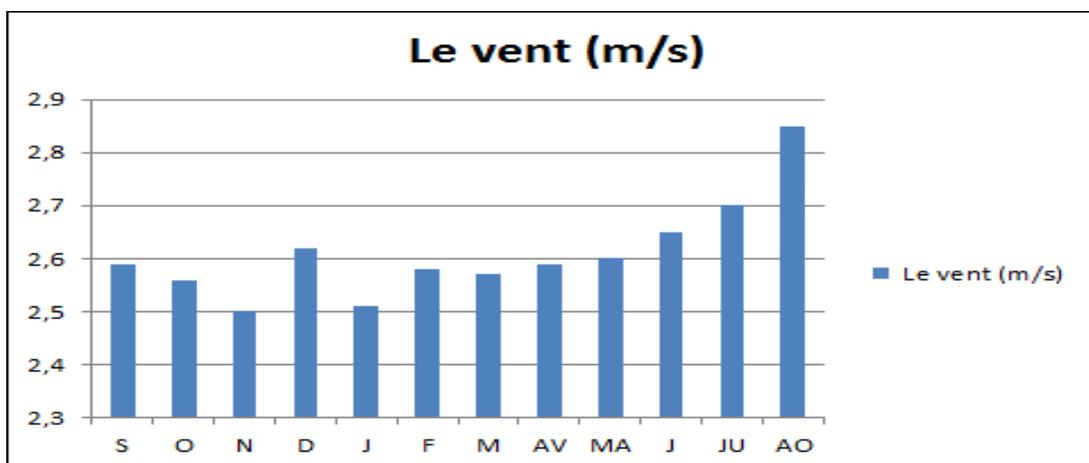


Figure 11. Vitesse moyenne mensuelle du vent de la wilaya de Bordj Bou Arreridj.

1.5. Insolation

La figure 12 montre l'insolation moyenne mensuelle de la wilaya de Bordj Bou Arreridj sur une période d'observation de 28 ans (1989/2018). Il est constaté que l'insolation attendue sa valeur maximale pendant le mois de aout avec une valeur de 95, et une valeur minimale pendant le mois de décembre avec une valeur de 59,39.

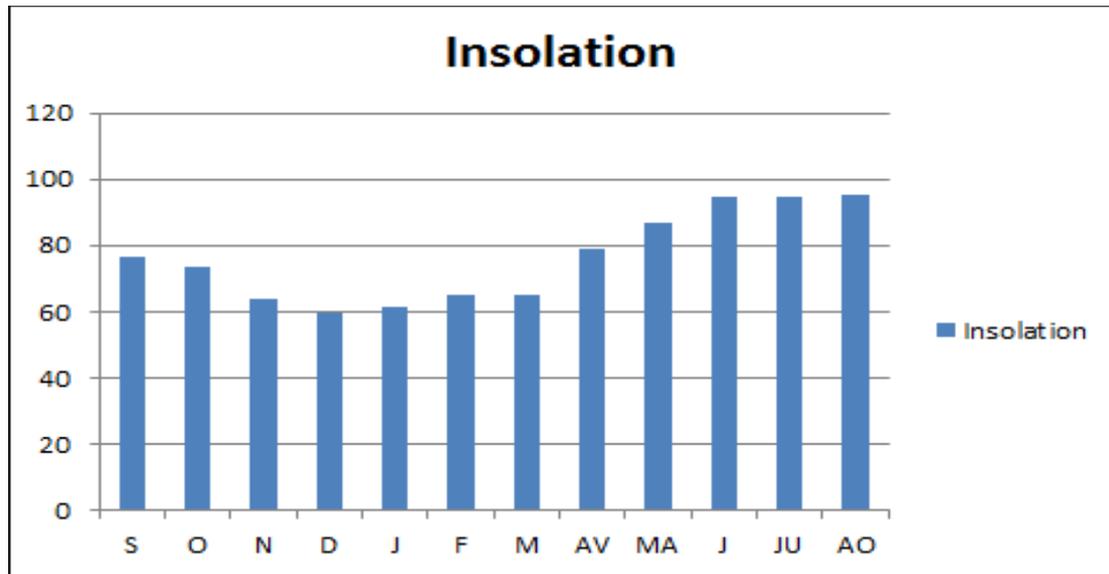


Figure 12. L'insolation moyenne mensuelle de la wilaya de Bordj Bou Arreridj.

2. Evaluation des dates de semis par le modèle AquaCrop

Comme nous l'avons cité auparavant (partie méthodologie), il s'agit de jouer sur les dates de semis, tout en fixant les paramètres d'entrées du modèle (climat, sol, culture et condition initiale). Les dates de semis proposées sont comme suit : 1 octobre, 10 octobre, 20 octobre, 30 octobre, 10 novembre, 20 novembre, 30 novembre, 10 décembre, 20 décembre et 30 décembre.

Pour ne pas encombrer le document, nous allons présenter les outputs de base du modèle AquaCrop du premier scénario (date de semis 01 octobre)

Scénarios N° 01 (date de semis : 01 octobre)

Dans cette section, nous allons analyser les outputs de base du modèle AquaCrop.

2.1. Pluie

La figure 13 montre la variation des pluies moyennes interannuelles sur la période d'étude. Il est constaté que la valeur moyenne des pluies reçues sur cette période est de l'ordre de 229,36 mm. Ce graphique permet d'indiquer l'année sèche et l'année humide, qui sont respectivement 1995-1996 (582 mm) et 1993-1994 (61 mm).

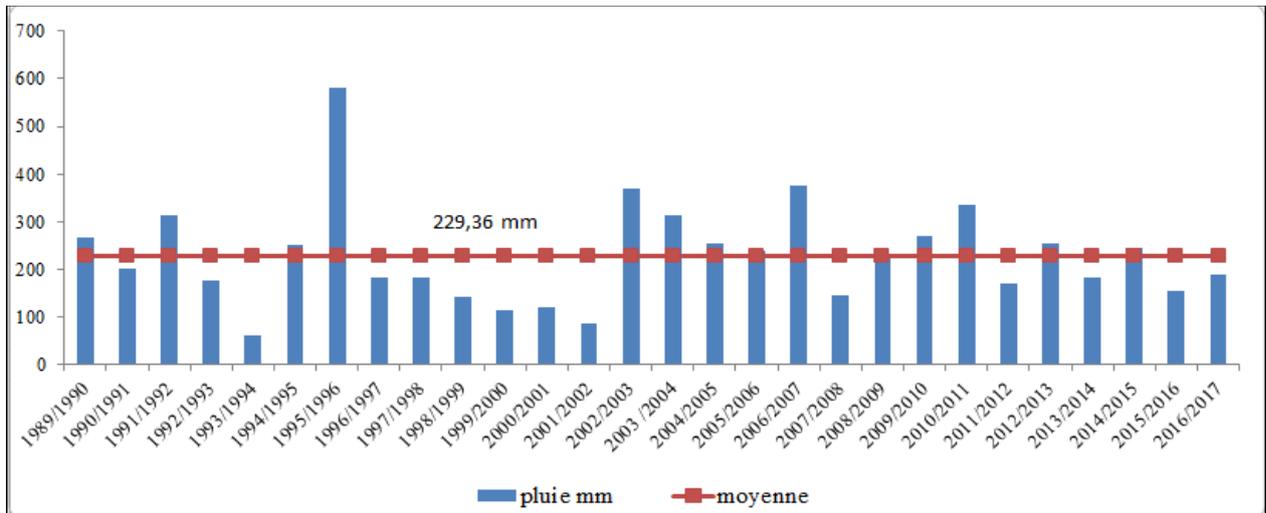


Figure 13. Les pluies moyennes interannuelles, période (1989-2017).

2.2. Evapotranspiration

Les variations interannuelles de l'évapotranspiration de référence (ET₀) à l'échelle de la saison de culture de blé dur, sont illustrées par la figure 14. Il est constaté que la valeur moyenne d'ET₀ sur la période d'étude est de l'ordre de 721,82 mm, fluctue entre un minimum de 107 mm (2015-2016) et un maximum de 980 mm (1999-2000).

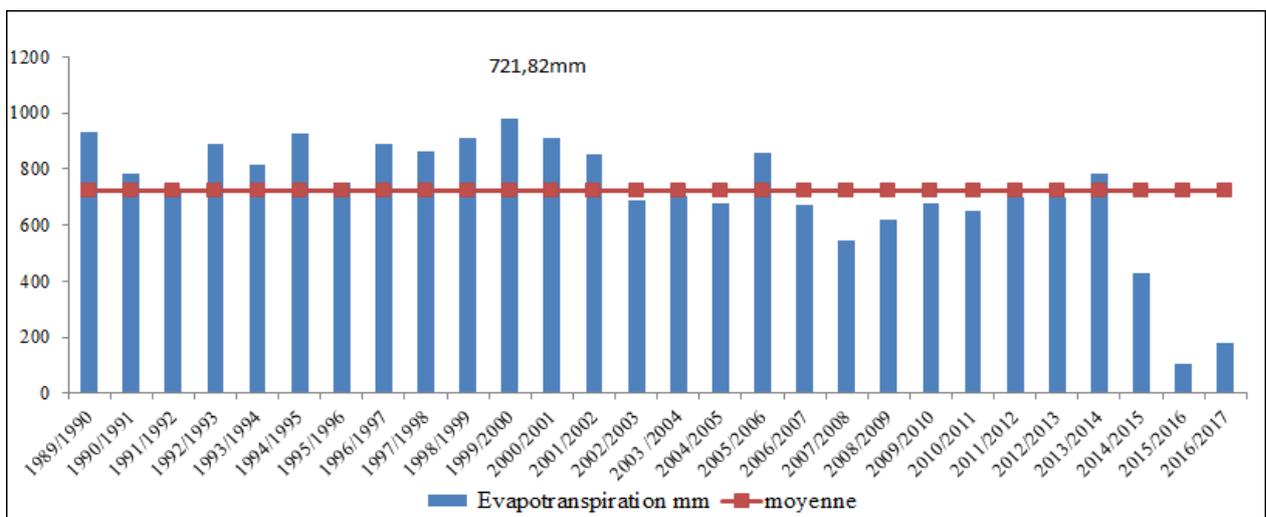


Figure 14. Les variations interannuelles de l'évapotranspiration durant la période 1989-2017

2.3. Evaporation

Les variations interannuelles de l'évaporation durant la période 1989-2017, sont présentées dans la figure 15.

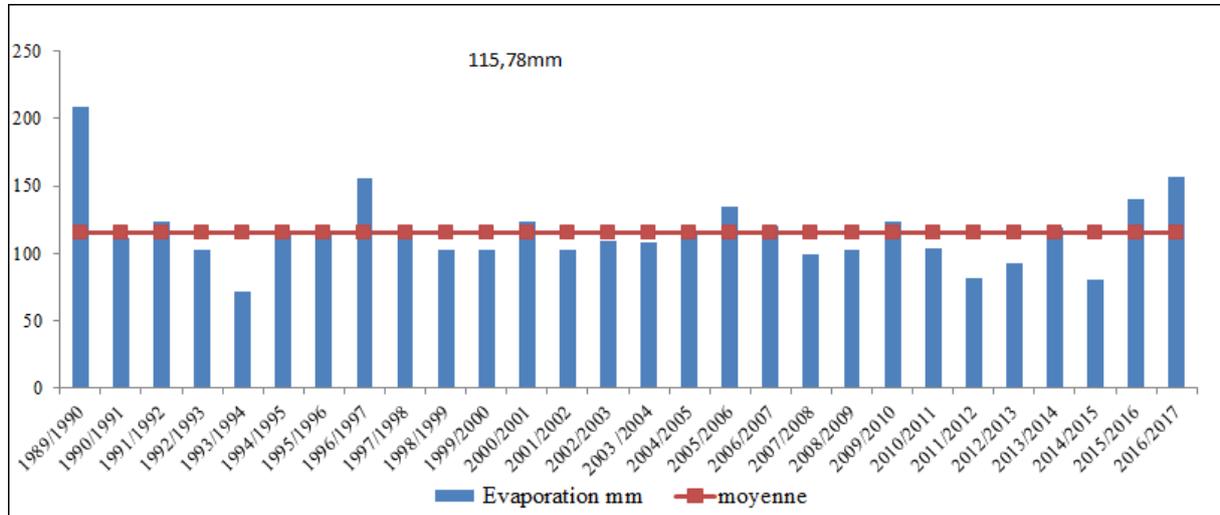


Figure 15. Evaporation interannuelle simulée par le modèle AquaCrop, période (1989-2017).

D'après cette figure nous constatons que l'évaporation moyenne interannuelle enregistrée sur la période d'étude est de 115,78 mm, fluctue entre un minimum de 72 mm (1993/1994) et un maximum de 209 mm (1989/1990).

2.4. Transpiration

Les variations interannuelles de transpiration durant la période 1989 à 2017, sont présentées dans la figure 16.

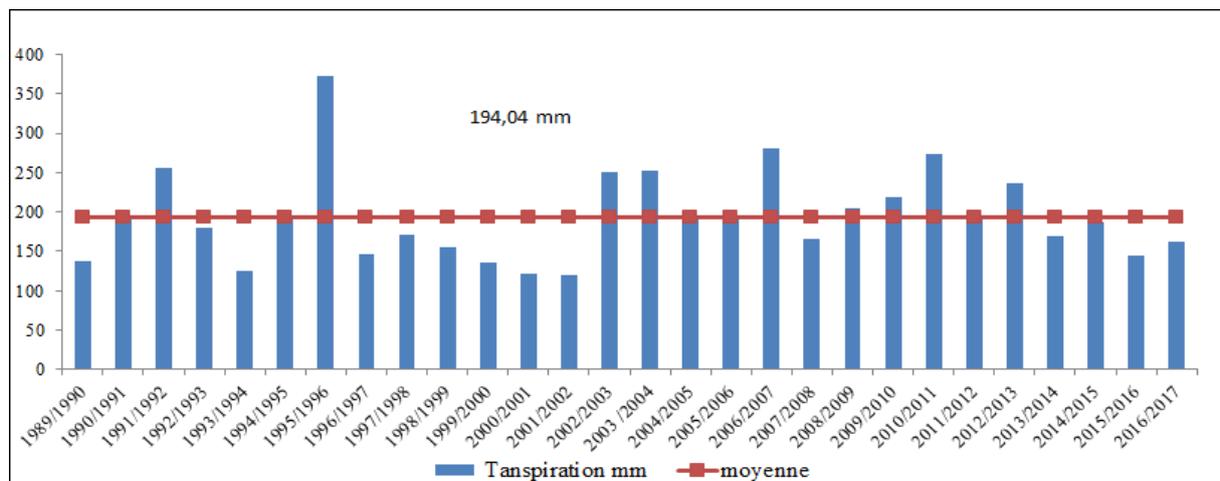


Figure 16. Transpiration interannuelle simulée par le modèle AquaCrop, période (1989-2017).

D'après cette figure, nous constatons que la transpiration moyenne interannuelle enregistrée sur la période d'étude est de 194,04 mm, fluctue entre un minimum de 120mm (2001/2002) et un maximum de 373 mm (2006/2007).

2.5. Besoin en eau

Les variations interannuelles des besoins en eau de la culture de blé dur durant la période d'étude (1989-2017), sont présentées dans la figure 17.

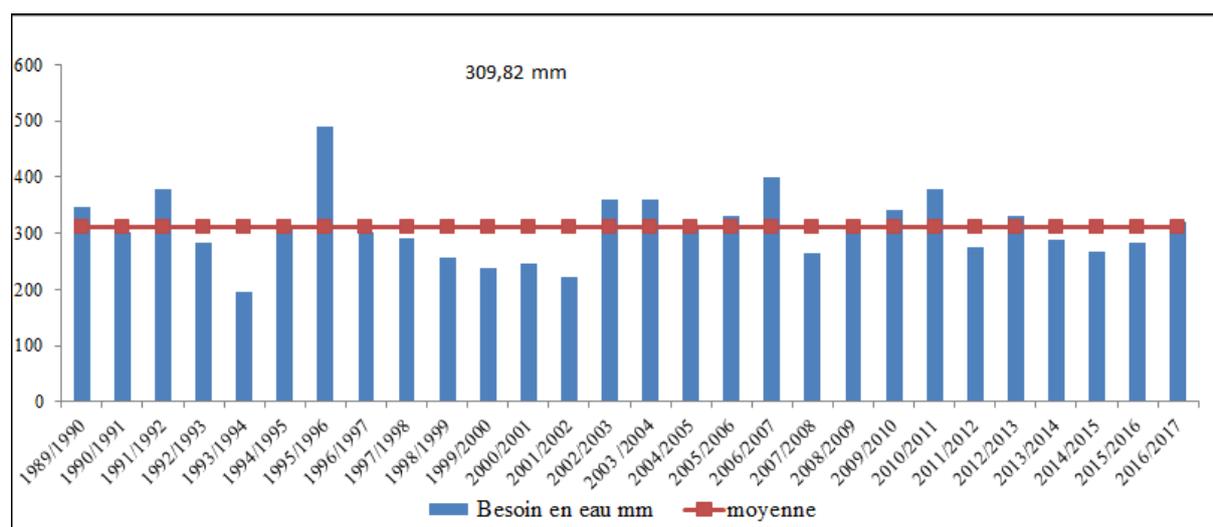


Figure 17. Variations interannuelles des besoins en eau de blé dur simulés par le modèle AquaCrop durant la période 1989-2017.

D'après cette figure. Nous constatons que le taux de besoin en eau de la culture de blé dur, le plus élevé est enregistré durant l'année 1995/1996 avec une valeur de 490 mm. Par contre le taux le plus faible est enregistré durant l'année 1993/1994, qui est de l'ordre de 197 mm. La valeur moyenne des besoins en eau de cette culture sur toute la période d'étude est de 309,82 mm. La fourchette des besoins en eau de la culture de blé dur signalée par la FAO est variée entre 500 et 700 mm, selon le climat.

2.6. Biomasse

Les variations interannuelles de la biomasse sèche de la culture de blé dur sur la période d'étude (1989-2017) sont présentées dans la figure 18.

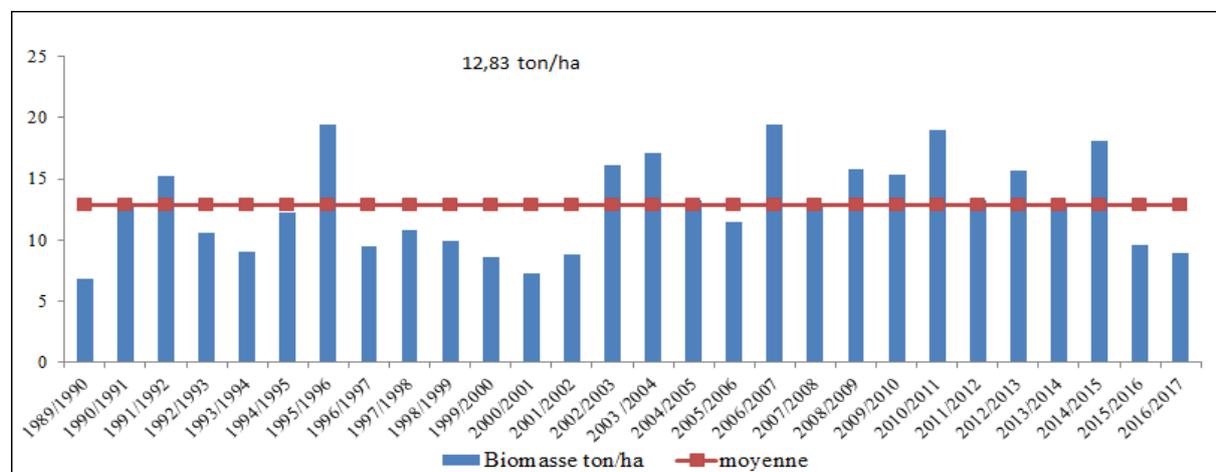


Figure 18. Variation interannuelle de la biomasse sèche simulée par le modèle AquaCrop durant la période d'étude (1989-2017).

D'après cette figure nous constatons que la biomasse sèche simulée par le modèle AquaCrop sur la période d'étude, fluctue entre un minimum de 6,86 ton/ha (1989-1990) et un maximum de 19,44 ton/ha (1995/1996). La biomasse sèche sur cette période est de l'ordre de 12,83 ton/ha.

2.7. Indice de récolte

Les variations interannuelles de l'indice de récoltes simulées par le modèle AquaCrop sur la période d'étude sont illustrées par la figure 19.

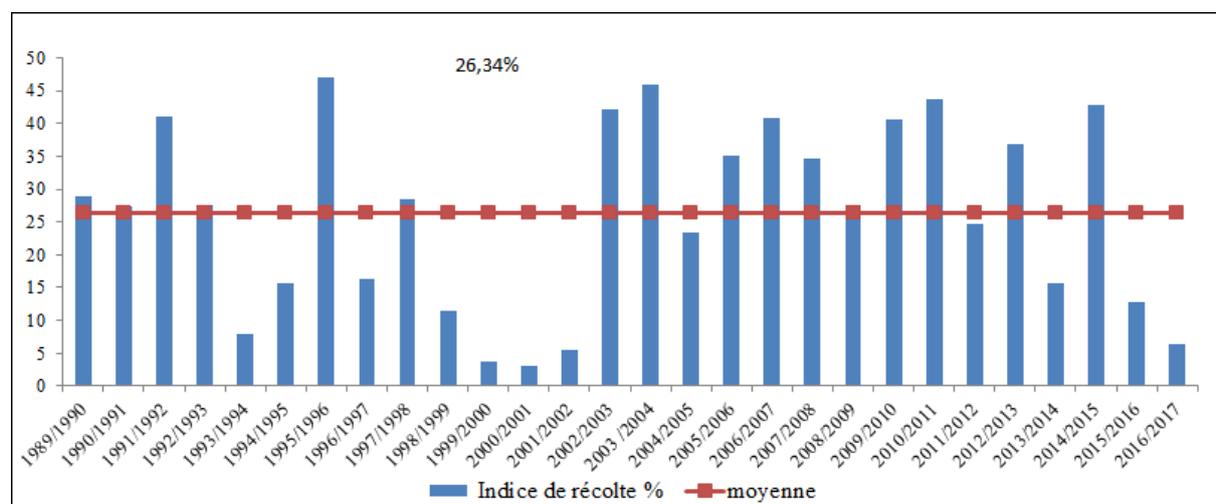


Figure 19. Variations interannuelles de l'indice de récoltes simulées par le modèle AquaCrop, durant la période 1989-2017.

Il est constaté que la valeur maximale de l'indice de récolte simulée par le modèle est de l'ordre de 47,1% pour l'année 1995/1996, et celle minimale est enregistrée dans l'année de 2001/2002 avec valeur de 3,1 %. Par contre la valeur moyenne de cet indice sur toute la période d'étude est de l'ordre 26,34 %.

2.8. Rendement

Les variations interannuelles des rendements simulés par le modèle AquaCrop sont montrées dans la figure 20

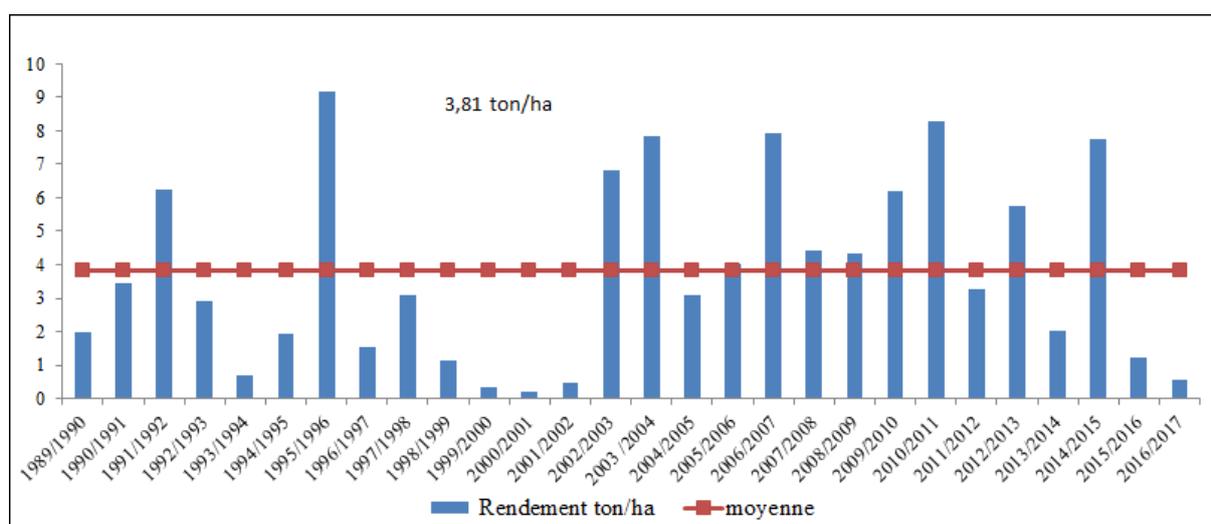


Figure 20. Variations interannuelles des rendements de la culture de blé dur simulés par le modèle AquaCrop durant la période 1989-2017.

D'après cette figure, il est constaté que la valeur moyenne du rendement de la culture de blé simulée par le modèle AquaCrop est de l'ordre de 3,81 ton/ha, fluctue entre un minimum de 0,47 ton/ha (2001/2002) et un maximum de 9,16 ton/ha (1995/1996). Cette différence est expliquée par les quantités de pluies reçues durant la période de saison, qui sont respectivement, 120 et 582 mm.

2.9. Productivité de l'eau

Les variations interannuelles de la productivité de l'eau simulées par le modèle AquaCrop sont illustrées par la figure 21.

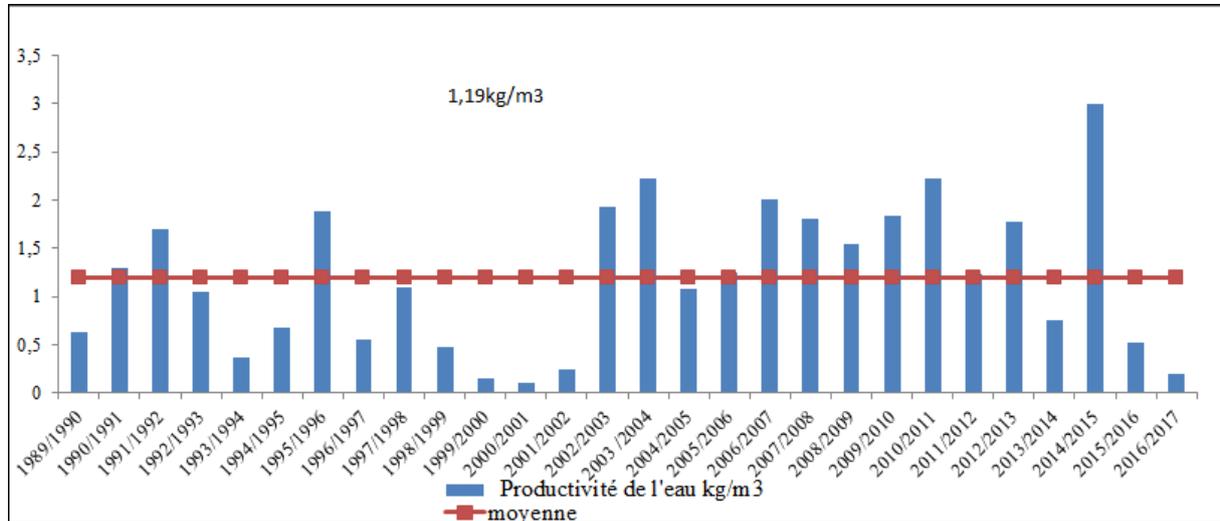


Figure 21. Productivité de l'eau simulée par le modèle AquaCrop durant la période d'étude (1989-2017).

Il est constaté que la valeur moyenne de la productivité de l'eau (WP) simulée par le modèle aquaCrop est de $1,19 \text{ kg/m}^3$, fluctue entre un minimum de $0,1 \text{ kg/m}^3$ (2000/2001) et un maximum de 3 kg/m^3 (2014/2015).

Note toutes les autres dates proposées sont analysées de la même manière et pour ne pas encombrer le document nous allons présenter uniquement la moyenne interannuelle de chaque paramètre analyse.

3. Impact des dates de semis sur :

3.1. Besoins en eaux des cultures (ETc)

La figure 22 représente les variations des besoins en eau de la culture de blé dur en fonction des dates semis proposées. On constate que la date 20 décembre enregistre un besoin maximal par rapport aux autres dates avec une valeur de 425,61 mm.

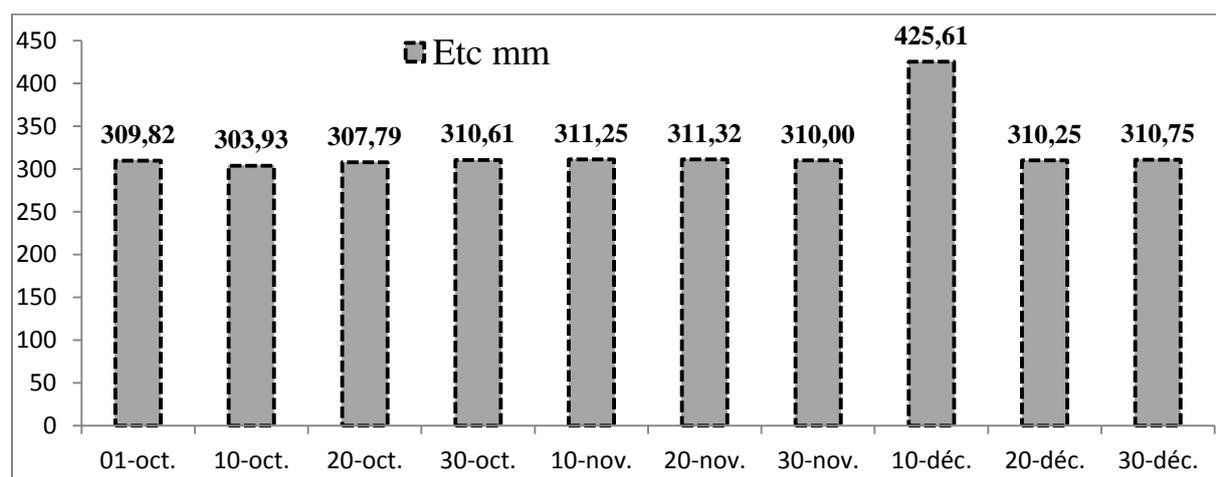


Figure 22. Les besoins en eau de la culture de blé dur en fonction des dates semis.

3.2. Biomasse

La figure 23 représente les variations de biomasse de blé dur selon les dates semis. Il est constaté que les valeurs maximales de la biomasse séchée sont enregistrées entre les dates de semis 10 octobre jusqu'au 10 novembre. Elles sont comprises entre 16,40 et 15,13 ton/ha. Par contre la date 30 décembre enregistre une mauvaise valeur par rapport aux autres dates proposées.

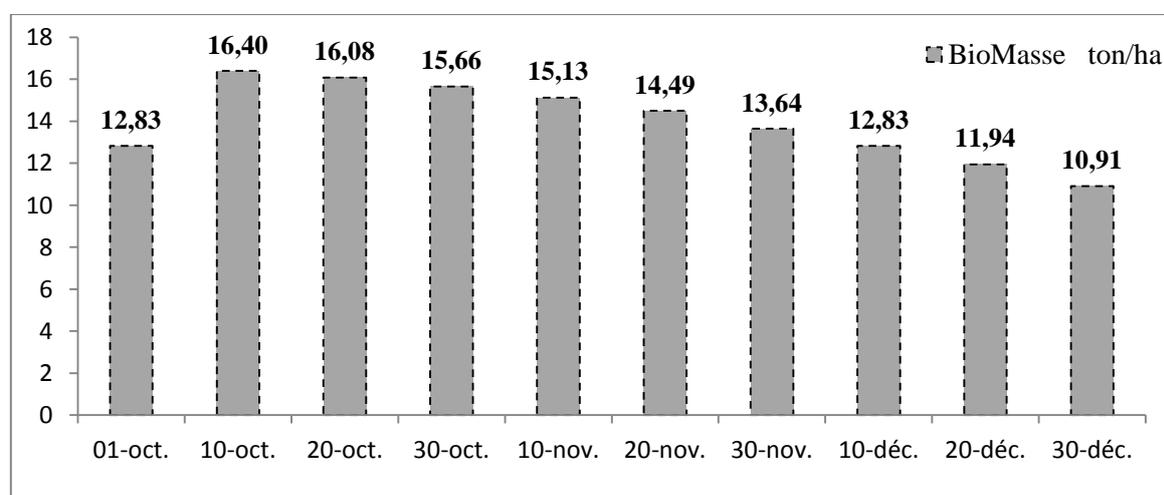


Figure 23. La biomasse de blé dur simulée par le modèle AquaCrop en fonction des dates semis.

3.3. Indice de récolte (IR)

En agriculture, l'indice de récolte (IR), est le rapport entre le rendement commercialisable d'une plante cultivée et la quantité totale de biomasse qui a été produite, exprimés en matière sèche. Cet indice, sans dimension, a une valeur comprise entre 0 et 1, il peut être aussi exprimé en pourcentage.

La figure 24 montre la variation de l'indice de récolte en fonction des dates de semis. Il est constaté que le meilleur pourcentage de cet indice est enregistré entre 10 octobre et 10 novembre. Ils sont compris entre 40,89 et 37,08 %. Néanmoins dans le détail, la 10 octobre a donné le meilleur pourcentage d'IR.

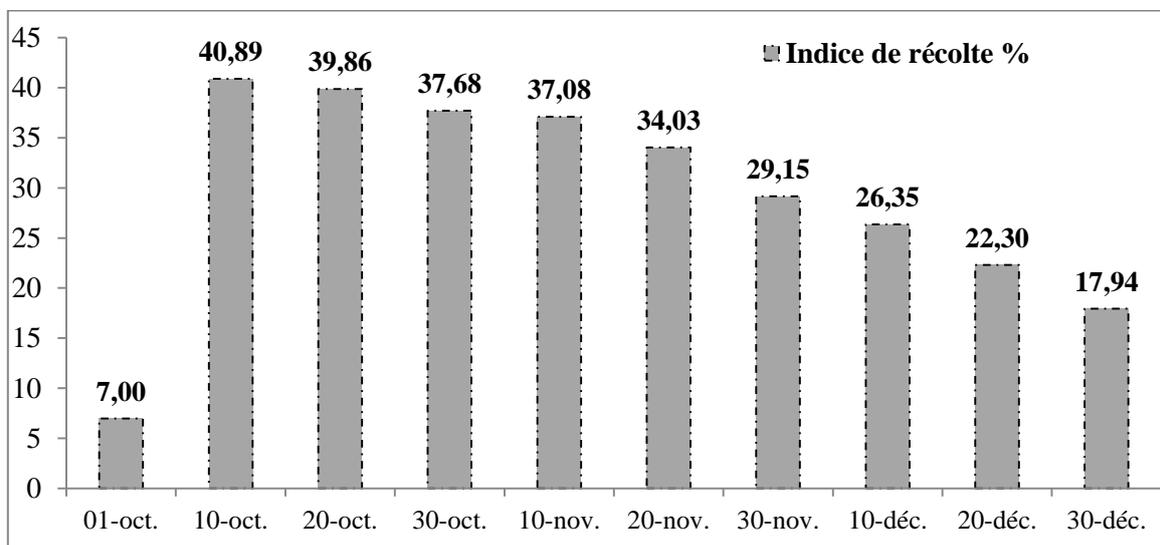


Figure 24. L'indice de récolte de blé dur en fonction des dates semis.

3.4. Rendement

L'obtention des meilleurs rendements est l'une des propriétés dans le secteur agricole. La figure 25 illustre la fluctuation des rendements de la culture de blé dur simulés par le modèle AquaCrop. Il est constaté que les rendements maximaux ont été atteints, entre 10 octobre et 10 novembre. Ils sont compris entre 5,24 et 6,91 ton/ha. Sur toutes les dates proposées (10 scénarios), le rendement maximal est atteint à la date 10 octobre (6,91 ton/ha).

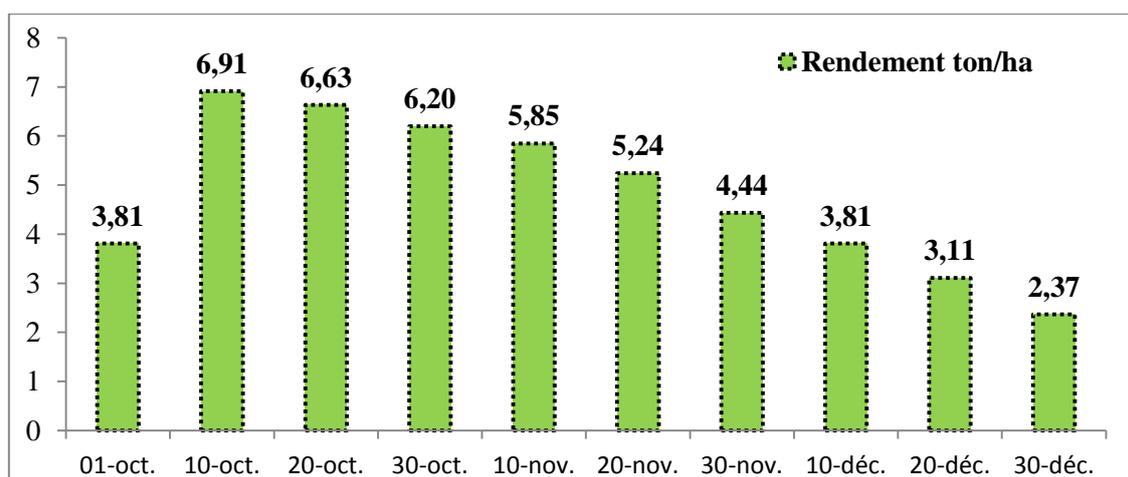


Figure 25. Les variations de rendement de blé dur en fonction des dates de semis.

3.5. Productivité de l'eau

La productivité de l'eau en agriculture est importante pour le défi mondial de l'eau. Elle est le rapport entre unité de produit et unité de facteur de production, est exprimée par kg/m^3 . La figure 26 illustre la variation de la productivité de l'eau de la culture de blé dur simulé par le modèle AquaCrop. Il est constaté que les valeurs maximales ont été atteintes, entre 10 octobre et 10 novembre. Elles sont comprises entre 2,40 et 0,73 kg/m^3 . Sur toutes les dates de semis proposées (10 scénarios), la productivité d'eau maximale est atteinte à la date 10 octobre (2,40 ton/ha).

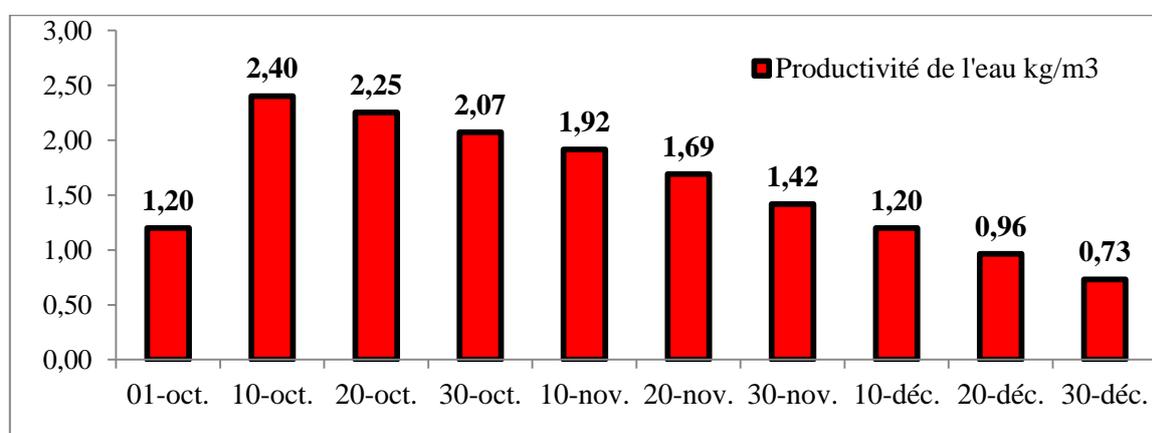


Figure 26. Productivité de l'eau de blé dur en fonction des dates semis.

Conclusion

La présente étude a pour but de déterminer les dates de semis du blé dur en vue d'augmenter les rendements et d'améliorer la productivité de l'eau en utilisant le modèle agronomique, AquaCrop, comme outil d'aide à la décision. Des dates de semis ont été proposées qui s'adaptent à la région d'étude (Wilaya de Bordj Bou Arreridj). La méthodologie consiste à faire tourner le modèle AquaCrop sur une période de 28 ans (1989-2017),

Les résultats de simulation ont montrés que les dates ont un effet très hautement significatif sur les rendements simulés. Les rendements maximaux ont été atteints, entre 10 octobre et 10 novembre. Ils sont compris entre 5,24 et 6,91 ton/ha..

La simplicité d'AquaCrop, ses données d'entrée nécessaires minimales facilement disponibles ou accessibles en font un outil convivial. Il est très utile pour les simulations de scénarios à des fins de planification et pourra être utilisés par les économistes, les administrateurs et les gestionnaires de l'eau.

Les références bibliographiques

- **Abassenne F., Bouzerzour H., Hachemi L.** (1998). Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum Desf*) en zone semi-aride d'altitude. *Annales Agronomiques*. INA ; 18 :24-36.
- **Alemie A. & Kebede A.**, 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley. Mekelle University, Department of Crop and Horticultural Sciences, Tigray, Ethiopia.
- **Allioui N** ,1993 : Etude de quelques altérations physiologiques et biochimiques causées par la rouille brune du blé, Thèse Magistère, Univ. ANNABA.
- **Amrani M**, 2013. culture de blé dur, institut technique des grandes cultures, ITGC, Algérie.
- **Andarzian, B.**, Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A. & Rahnama, A. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100:1-8.
- **Andi .**, (2013). Agence national de développement de l'investissement, monographie de la wilaya de Bordj Bou Arreridj, 6-11.
- **ANDI.**, (2013). Agence national de développement de l'investissement, monographie de la wilaya de Bordj Bou Arreridj.
- **Anonyme**, 2008. Bilan des activités agro-techniques de l'institut technique des Grandes Cultures, Algérie ITGC p13.
- **Bahlouli F., Bouzerzour H. et Benmahammed A.**, 2008 « Effet de la vitesse et de la durée du remplissage du grain ainsi que de l'accumulation des assimilats de la tige dans l'élaboration du rendement du blé dur (*Triticum durum Desf.*) Dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie », *Biotechnol. Agron. Soc et Environ.*, Vol.12, pp: 31-39.
- **Bahlouli F., Bouzerzour H. , Benmahammed A.** (2005). Selection of stable and high yielding cultivar of durum wheat under semi –arid condition .*Pakistan Journal of Agronomy*, 360-365.
- **Baier W.**, 1979 Note on the terminology of crop-weather models. *Agric meteorol* 20 :137-145.

- **Baldy C.**(1984). Utilisation efficace de l'eau par la végétation en climats méditerranéens. Bull .Soc .Boton .Fr 131(2, 3, 4) (actuel Boton) 491-499.
- **Baldy Ch (1992)** Effet du climat sur croissance et le stress hydrique des blé méditerranéens occidentaux In Tolérance a la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Ed INKA, Paris, 397.
- **BelaidD.**(1986). Aspects de la céréaliculture Algérienne. Edition OPU. Alger, 207 p.
- **Benbelkacem A.**, 1997 « Etude de l'adaptation variétale des céréales cultivées en Algérie sous différentes conditions agro- écologiques », Céréaliculture, N°31, ITGC/ MADR, pp: 17-22.
- **Benbelkacem A., Sadli F., Brinis L.** ,1995. « La recherche pour la qualité des blés durs en Algérie », Options Méditerranéennes Série A / N°22, Zaragoza (ESP). Institut des sciences biologiques, Université d'Annaba, Algérie, pp: 61-65.
- **Bennasseur A.**2003. Référentiel pour la conduite technique de la culture de blé dur(*Triticum durum* Desf) : 24-38
- **Bonhomme R.**, Drouet T., Améglio T. Introduction à la modélisation du fonctionnement physiologique d'un couvert, école des chercheurs INRA. Tome 1 : de la plante au couvert végétal, Actes. Le Croisic. 1995. (FRA), 647-669.
- **Boufenar-zaghoufane F. et zaghofane O.** (2006). Guide des principales variétés de céréales à paille en algérie(blé dur ,blé tendre, orge et avoine) 1ère édition .alger : ECRIE.154p
- **Boulelouah N.** (2002). Analyse de la variabilité génotypique de l'absorption de l'azote chez le blé tendre. DEA.INA. Paris Grignon, 33p.
- **Bozzini A.** (1988). Origin, distribution and production of durum wheat in the world.
- **Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne- Baret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R.** STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie. 1998. vol, 18, pp. 311-346.
- **Clarke J. M., Norvell W. A., Clark F. R., Buckley T.W.** (2002). Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum lines. C. J. P. canadienne de phytotechnie, 82 : 27-33 .
- **Clement G. et Prats J.** (1970). Les céréales. Collection d'enseignement agricole. 2ème Ed. 351 p.

- **Daaloul A.**, 1988 « La technologie dans l'agriculture tunisienne : Cas du secteur céréalière », Communication présentée au Colloque Tuniso - Américain : Une Agriculture Stabilisée pour la Tunisie au XXI Siècle. Tunis, pp: 66-77.
- **Debeche, E., Belkasm, F., Bouhalifa, Y., & Belkheir, B. (2013).** Typologies des systèmes d'élevages bovins laitiers dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj.
- **Direction d'urbanisme d'architecture et de construction.** (2008). PDAU Bordj Bou Arreridj. Bordj Bou Arreridj.
- **DSA** ,2017 : Direction des Services Agricole dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj
- **Gate P.** Ecophysiologie Du Blé. Technique Et Documentation - Lavoisier, 11 Rue Lavoisier-F 755384-Paris Cedex 08.1995.
- **Gate P. H.** (1995). Ecophysiologie du blé. Technique et Documentation. Lavoisier, Paris, 419p.
- **Gate P., Giban M.** (2003). Stade du blé. Ed. Paris, ITCF. 68p.

GateP.(1995). Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. Lavoisier Tec&Doc, Paris, 429p.

- **Gonde P., Ratomahenina R., Arnaud A. et GalzyP.** (1986). Purification and properties of the exocellular β -glucosidase of *Candida molischianan* (Zikes) Meyer and Yarrow capable of hydrolyzing soluble cellodextrins. Can, J. Biochem. Cell. Biol. 363:1160-1166.
- **Hennouni, N.** (2012) "Evaluation du métabolisme respiratoire et enzymatique des racines de blé dur (*Triticum durum* Desf) issues de plantes infectées par les maladies cryptogamiques et de plantes traitées avec un fongicide", Thèses de doctorat, département de biologie, Université BADJI Mokhtar de Annaba, 2012.
- **Henry Y. and De Buyser J.** (2000). L'origine des blés. Pour la Science, Hors-série n°26, pp 60- 62.
- **Hoogenboom G.**, 2000 contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. Agri for meteorolo 103 :137-157.
- **Hucl P., Baker R. J.** (1998). Tillering patterns of spring wheat genotype grown in a semi-arid environment. Can J PlantSci 1989, 69 :71-9.
- **Karou M., Haffid R., Smith D.N., SAMIR K.**(1998). Roots and growth water use and water use efficiency of spring durum wheat under early ,season drought. Agronomie 18, 18: 186.

- **Maamri A. et Silem M.**, 2010. Contribution à l'étude de l'effet de la technique du semis direct sur la production céréalière en milieu semi –aride. Cas de la région de Béni–Fouda–Sétif, Thèse d'ingénieur, Université de M'sila; 80 p.
- **Mazoyer M.** (2002). La rousse agricole. Ed. Paris, pp : 320-321 ; 673.
- **Monteith J.I.** Solar Radiation And Productivity In Tropical Ecosystems. J. Appl. Ecol., 9: 747-766. 1972.
- **Mouellef A.**, 2010. Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf) au stress hydrique. Mémoire de Magister en Biotechnologies Végétales, éditeur. Lakhdar, Batna, 93 p.
- **Moule C.**, (1971). Céréales 2. Phytotechnie spéciale. (Ed). 236p.
- **Mourima Mai Moussa.**, 2005 les conséquences des changements climatiques sur l'occurrence des phénomènes climatiques extrêmes, centre régional AGRHYME de Niamey,
- **Nasro-allah A.** Simulation de chaînes de Markov et techniques de réduction de la variance. ., 1992. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, France.
- **Oiganji E.** , Igbadun H.E., Mudiare O.J & Oyebode M.A., 2016. Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in Northern zone of Nigeria. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, vol. 18, n°3. 14p.
- **Raes, D.**, Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. Agron J, 101 : 438–447.
- **Raes, D.**, Steduto, P., Hsiao, T.C., et Fereres, D., 2011. AquaCrop – The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: Reference Manual. p. 265
- **Ramade, F. (2003)**. Eléments d'écologie- écologie fondamentale. Ed. Dunod, Paris, 689 p.
- **Ritchie JT.**, 1998.soil water balance and plant water stress In understanding options for agricultural production. Kluwer drodrecht , the netherlands, pp 41-54.
- **Saunier- associes. (2010)**. Mémoire général d'APS. Bordj El kiffan - Alger.
- **Soltner D.** (1988) .Les bases de la production végétale. Troisième édition ,566p.
- **Soltner D.** (2000) ; Phytotechnique générale : les bases de la production végétales. Tome 1 : le sol et son amélioration. Ed. Collection sciences et techniques agricoles, 467p.
- **Soltner D.** (2005). Les grandes productions végétales. 20ème Edition. Collection science et techniques agricoles. 472p.

- **Soltner D.** (1990). Les grandes productions végétales : céréales, plantes sarclées, prairies. coll. science et techniques agricoles. 17^{ème} Ed. 464p.
- **Soltner D.** (1987). Les grandes productions végétales « Céréales –plante sarclées- prairies ». 15^{ème} édition . Collecton sciences et techniques agricoles : 461 p.
- **spaeth s-c. and sinclair t-r.** Linear increase in soybean harvest index during seedfilling. 1985. *Agronomy Journal* 77, 207-211.
- **Srivastava J. P.,** 1984 « Durum wheat : its world status and potential and the Middle East and North Africa », *Rachis*, 3, pp: 1-8.
- **Toumia J.,** Er-Rakib S., Ezzaharc J., Khabbaa S., Jarlan L., Chehbounid A., 2015. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, vol 163. p. 219 – 235.
- **Van ittersum M.K.,** Leffelaar P.A., Van Keulen H., Kropff M.J., Bastiaans L., Goudriaan J., 2002. On Approaches And Applications Of The Wageningen Crop Models, *European Journal Of Agronomy*, 18: 201-234.
- **Wellens, J.,** 2014. A framework for the use of decision-support tools at various spatial scales for the management of irrigated agriculture in semi-arid West-Africa. Ph.D. dissertation. Université de Liège, Liège, Belgium. 106 p.
- **Wit AL, Steiner C, Damato AN** (1970) Electrophysiologic Effects Of Bretylium Tosylate On Single Fibers Of The Canine Specialized Conduction System And Ventricle. *J Pharmacol Exp Ther* 173: 344-356.