



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريش

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A.

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers  
قسم العلوم الفلاحية

Département des Sciences Agronomiques



## Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master  
Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie  
Filière : Sciences Agronomiques  
Spécialité : Amélioration des plantes

### Intitulé

**Validation Du modèle « AQUACROP » sur la  
culture du blé dur « Triticum durum » dans deux  
en milieu semi-aride**

Présenté par :  
- Mebarkia Meriem

Devant le jury :

Président	: M <sup>ME</sup> BOURAHLAA	MCB
Encadreur	: M <sup>1</sup> MAAMRIA	MAA
Examineur	: M <sup>me</sup> CHOURGHAL N	MCB

# Sommaire

## Liste des Abréviations

## Liste des Figures

## Liste des Tableaux

Introduction.....	01
-------------------	----

## Partie 01 : Synthèse bibliographique

<b>Chapitre I: Généralité sur le blé</b>	
I.1. Histoire et l'origine géographique de blé dur.....	03
I.2. Origine génétique de blé dur.....	04
I.3. Classification botanique.....	05
I.4. Importance et production du blé.....	05
I.4.1. Dans le monde.....	05
I.4.2. Dans l'Algérie.....	06
<b>Chapitre II : Les contraintes biotique, abiotique et les effets du stress hydrique sur le blé dur</b>	
II.1. Les stress.....	08
II.2. Les catégorie de stress.....	08
II.2.1. Stress biotique.....	08
II.2.1.1. Les maladies principales du blé dur.....	08
II.2.2. Stress abiotique.....	08
II.2.2.1. Les type de stress abiotique .....	09
II.2.2.1.1. Le stress salin.....	09
II.2.2.1.2. Le stress thermique.....	09
II.2.2.1.3. Les stress hydrique.....	10
II.2.2.1.3.1. Les effets de stress hydrique sur le blé dur.....	10
II.2.2.1.3.2. Les stratégies d'adaptations au stress hydrique.....	12
<b>Chapitre III : Modélisation et les modèles de culture</b>	
III.1. Modèle et modélisation.....	18
III.1.1. La Modélisation.....	18

III.1.2. Le Modèle.....	18
III.1.3. L’objectif de modèle.....	18
III.1.4. Les étapes de la modélisation.....	19
III.1.5. La modélisation agronomique.....	19
III.2. Modèle de culture.....	20
III.2.1. Définition.....	20
III.2.2. Histoire de modèle de culture.....	20
III.2.3. Les groupes majeurs de modèle.....	21
III.2.4. La structure générale des modèles de culture.....	22
III.2.5. Les domaines d’utilisation des modèles de culture.....	22
<b>Partie 02 : Partie pratique</b>	
<b>Chapitre I: Matériel et méthodes</b>	
I.1. Les Sites de l’expérimentation.....	24
I.2. Présentation des régions d’étude .....	24
I.3. Matériels végétales.....	26
I.4. La description des variétés.....	27
I.5. Dispositif expérimental.....	27
I.6. AquaCrop.....	28
I.6.1. Description de l’AquaCrop.....	28
I.6.2. La structure AquaCrop.....	30
I.6.3. Les données d’entrée du modèle AquaCrop.....	31
I.6.4. Les données de sortie du modèle AquaCrop.....	33
I.6.5. Calibration et validation du modèle.....	33
I.6.6. Evaluation du modèle.....	35
<b>Chapitre II : Résultats et discussions</b>	
II.1. Résultats.....	37
II.1.1. Comportement métrologique.....	37
II.1.1.1. La température.....	27
II.1.1.2. La pluviométrie.....	37
II.1.2. Simulation du bilan hydrique.....	41

II.1.2.1. Paramètres de mesures.....	41
II.1.2.2. Phases de stress hydrique selon la phénologie.....	42
II.1.3. Simulation et Evaluation des composants du rendement par AquaCrop...	43
II.1.3.1. Le rendement grain .....	45
II.1.3.2. La biomasse aérienne.....	45
II.1.3.3. L'indice de récolte (IR).....	45
II.2. Discussion.....	47
II.2.1. Stress hydrique .....	
II.2.1.1. L'effet du stress hydrique sur les paramètres du rendement.....	51
II.2.2. Simulation des composants du rendement par Aquacrop.....	
<b>Conclusion</b> .....	
<b>Références bibliographiques</b>	
<b>Annexe</b>	

## Liste abréviation

---

**ALT 84** : Altar 84

**Bio** : Biomasse aérienne

**BSS** :Bousselem

**CIMMYT** :Centre international d'amélioration du maïs et du blé(Mexique).

**CO<sub>2</sub>** :Gaz dioxyde de carbone

**DSA** : Direction des services agricoles

**ET** : Evapotranspiration

**ET<sub>c</sub>** : Evapotranspiration de culture.

**ET<sub>m</sub>** : Evapotranspiration maximale.

**ET<sub>o</sub>** : Evapotranspiration de référence

**ETP** : Evapotranspiration potentielle

**ETR** : Evapotranspiration réelle

**FAO** : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

**Ha** : Hectare

**ICARDA** : Centre international de recherche agricole dans les zones arides

**IR** : Indice de récolte

**K<sub>s</sub>** : Coefficient de stress

**MX 75** : Mexicali 75

**OZ** : Oued Znati

**PE** :PotentialError

**qx/ha** :quintaux/hectare.

**qx**:quintonx

**Rdt** : Rendement grains

**SH** : stress hydrique

**T** : Transpiration

## Synthèse bibliographique

<b>Figure 01 :</b> Origine et diffusion de <i>Triticum turgidum</i> .....	04
<b>Figure 02 :</b> Origines et généalogie du blé.....	05

## Matériels et Méthodes

<b>Figure 03:</b> Situation du site de l'expérimentation .....	25
<b>Figure 04 :</b> Localisation de la commune de Bordj Ghedir (Chenia) dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj.....	26
<b>Figure 05:</b> Schéma du dispositif expérimental de l'essai en plein champ les deux régions (INRAA Sétif et Chania 2015-2016) .....	28
<b>Figure 06 :</b> Organigramme d'AquaCrop indiquant les principales composantes de la relation sol-eau-plante.....	29
<b>Figure 07 :</b> les fenêtres d'AquaCrop.....	30
<b>Figure 08 :</b> Données d'entrée définissant l'environnement dans lequel la culture va se développer.....	32

## Résultat

<b>Figure 09 :</b> Diagramme représentant les Pluviométries et les températures moyennes enregistrées sur le site INRAA de Sétif (2015-2016).....	
<b>Figure 10 :</b> Diagramme représentant les Pluviométries et les températures moyennes enregistrées sur le site de la région 2 (Chenia) (2015-2016).....	

### Discussion

- Figure 11** : Relation entre le stress hydrique de la phase 1 (semi-levé) avec le rendement les deux régions (INRAA, Chania) .....46
- Figure 12** : Relation entre le stress hydrique de la phase 2 (levé-épiaison) avec le rendement les deux régions (INRAA, Chania) ..... 46
- Figure 13** : Relation entre le stress hydrique de la phase 3 (épiaison-maturation) avec le rendement les deux régions (INRAA, Chania)..... 47
- Figure 14** : Relation entre le rendement observée et simulée par Aquacrop dans les deux régions (INRAA, Chania).....49
- Figure 15**: Relation entre la biomasse observée et simulée par Aquacrop en les deux régions (INRAA, Chania).....50
- Figure 16** : Relation entre l'indice de récolte observée et simulée par Aquacrop pour les deux régions (INRAA, Chania)..... 51

Depuis leur découverte et leur domestication par les cultivateurs des premières civilisations, les céréales ont toujours été au cœur d'enjeux politiques, économiques et sociaux de premier rang (**Roudart, 2006**). Le blé est aujourd'hui considéré parmi les récoltes les plus avancées dans le monde, avec une production annuelle excédant les 606 millions de tonnes pendant la dernière décennie (**FAO, 2009**). Cette importance s'explique par deux aspects différents, l'un économique et l'autre culturel (**Hawkes, 2004**).

L'Algérie a une superficie agricole totale d'environ 42,5 million d'hectares dont 20% seulement est utile (**MADR, 2012**). La céréaliculture demeure une spéculation stratégique de notre agriculture. Elle occupe près de trois millions d'hectares. La production a connu des augmentations sensibles, passant de près de 18 millions de quintaux au début des années 1960 (**Hervieu *al.*, 2006**) à plus de 51 millions de quintaux en 2012 (**MADR, 2012**). Le blé dur y occupe une superficie prépondérante dans l'agriculture, cette espèce considérée comme une culture stratégique.

La multiplication de blé reste tributaire par des stress biotiques et abiotiques qui représentent de réelles contraintes affectent les rendements (**Turki *et al.*, 2014**). Hormis les stress abiotiques, tel le stress hydrique, le stress salin et le stress thermique; les stress biotiques exercés notamment par les maladies sur les plantes cultivées représentent l'une des contraintes majeures qui caractérisent le milieu de la production végétale à l'échelle mondiale (**Noir, 2002 ; Benmahammed *et al.*, 2010**).

La production agricole dans le monde est fortement limitée par le stress hydrique, qui devient de plus en plus contraignant pour la croissance et le développement des plantes notamment dans les zones semi-arides et arides (**Belkhodja *et al.*, 2004**). Il provoque une instabilité de la production suite aux fluctuations qui touchent surtout les cultures pluviales et plus particulièrement les céréales, qui restent faibles et très irrégulières dans l'espace et le temps (**Annichiarico *et al.*, 2005 ; Kadi *et al.*, 2010**).

Des travaux réalisés depuis plusieurs décennies sur l'effet de stress hydrique et l'efficacité d'utilisation de l'eau, s'orientent essentiellement, soit vers des approches expérimentales, soit vers des approches basées sur des modèles (**Aouade, 2012**). Ces modèles peuvent être classés en deux groupes : des modèles complexes comme SISPAT (**Braud *et al.*,**

2004) et des modèles simples et opérationnels comme FAO-56 (Erraki, 2007) et STICS (Hadria, 2006) et AquaCrop (Andarzian et al., 2011). Dans ce travail, nous proposons d'utiliser le modèle AquaCrop développé par La FAO.

Cette étude a pour le but est la validation du modèle de culture « AQUACROP » testé sur les quatre variétés du blé dur, deux génotypes locaux (Oued Zeneti, Bousselem) et deux autres introduites (Altar 84, Mexicali 75) cultivées dans deux régions différentes semi-aride (INRAA de Sétif et Chania à Bordj Bou Arreridj).

Ce mémoire comporte deux parties, **une partie théorique** qui se divise en trois chapitres, **dans le premier chapitre** on aborde des généralités sur le blé, **au deuxième chapitre** on parle sur les contraintes de production de blé dur et les effets de stress hydrique et on évoque la modalisation et les modèles de culture **au chapitre trois**.

**La partie pratique comporte deux chapitres**, le premier concerne le matériel utilisé, les méthodes suivies durant le travail. Le second chapitre comporte les résultats obtenus et leurs discussions.

**Etude bibliographique**

**Tableau I :** Le marché mondial du blé .....02

**Tableau II :** Bilan des importations de l'Algérie des principales céréales.....

**Matériels et Méthodes**

**Tableau III :** L'origine les quatre variétés de blé dur.....

**Tableau IV:** Paramètres utilisés dans AquaCrop.....

**Résultats**

**Tableau V:** Résultats de la simulation du bilan hydrique des quatre variétés dans les deux régions (l'INRA et Chania).....

**Tableau VI:** Pourcentage du stress hydrique selon les stades des régions (l'INRAA et Chania).....

**Tableau VII:** Comparaison entre valeurs simulées et observées du rendement, des deux régions (l'INRAA et Chania).....

**Tableau VIII:** Comparaison entre valeurs simulées et observées la biomasse aérienne des deux régions (l'INRAA et Chania).....

**Tableau IX :** Comparaison entre valeurs simulées et observées l'indice de récolte des deux régions (l'INRAA et Chania).....

**Tableau X :** Valeurs des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle .....

## I. Généralités sur le blé

Le blé (*Triticum*) fait partie des trois grandes céréales avec le maïs (*Zea*) et le riz (*Oryza*). C'est la troisième espèce par importance de la récolte mondiale, et la plus consommée par l'homme. En Algérie, le blé est cultivé pour son grain. On distingue deux espèces de blé: Le blé tendre et le blé dur essentiellement cultivé pour la semoulerie, en vue de la fabrication des pâtes alimentaires, couscous et pain (**Bataillon et al., 2006**).

### I.1. Histoire et l'origine géographique de blé dur

La saga du blé accompagne l'histoire de l'homme et l'agriculture (**Feillet, 2000 ; Mouellef, 2010**). Selon **Henry et De Buyser (2001) ; Naville (2005)** la culture de l'engrain est attestée, au septième millénaire avant J.-C., au Kurdistan irakien, dans le sud-est de la Turquie et dans le sud des Balkans. L'amidonnier était la principale céréale cultivée par les premiers agriculteurs du proche orient (Figure 01).

C'est probablement par l'intermédiaire des régions montagneuses du croissant fertile qu'il est parvenu dans les plaines de Mésopotamie au sixième millénaire avant J.C., d'où il était introduit en Egypte, en Europe, en Asie centrale et en Inde au cinquième et quatrième millénaires (Figure 01). L'épeautre aurait été cultivé dans la région du Haut-Rhin au cours du deuxième millénaire avant J.C (**Verville, 2003**).

En Algérie, selon **Pictav (1856)** le Blé dur (*T. durum*) était la seule variété connue de la population autochtone avant la colonisation française. Léon Ducellier (1878-1937), découvrit et analysa les nombreuses variétés, qui peuplaient les champs cultivés recueillit les échantillons les plus caractérisés, les plus productifs (**Lery, 1982**).

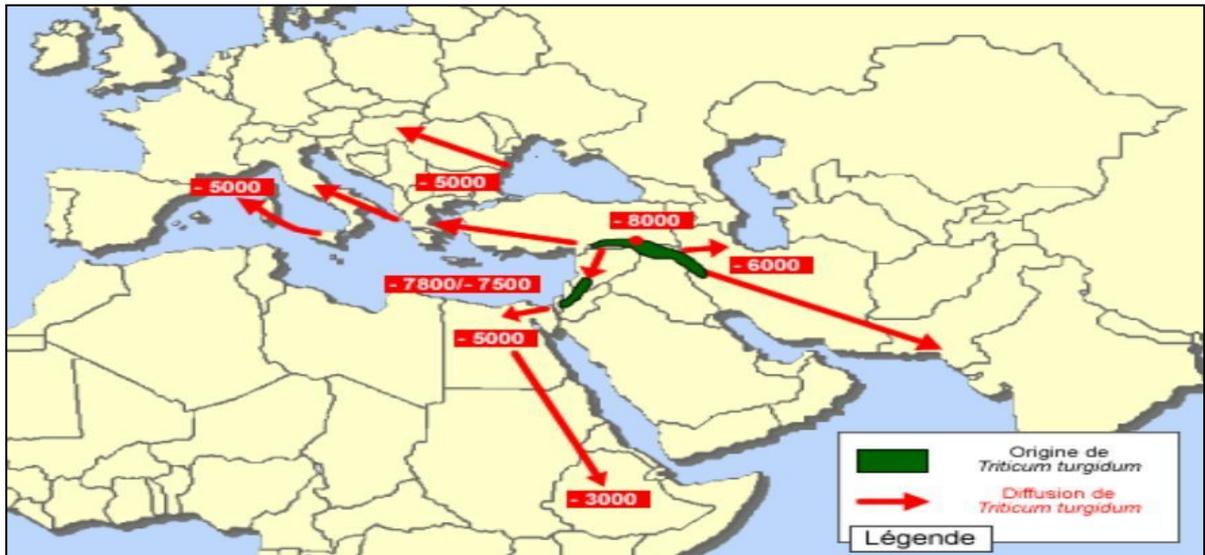


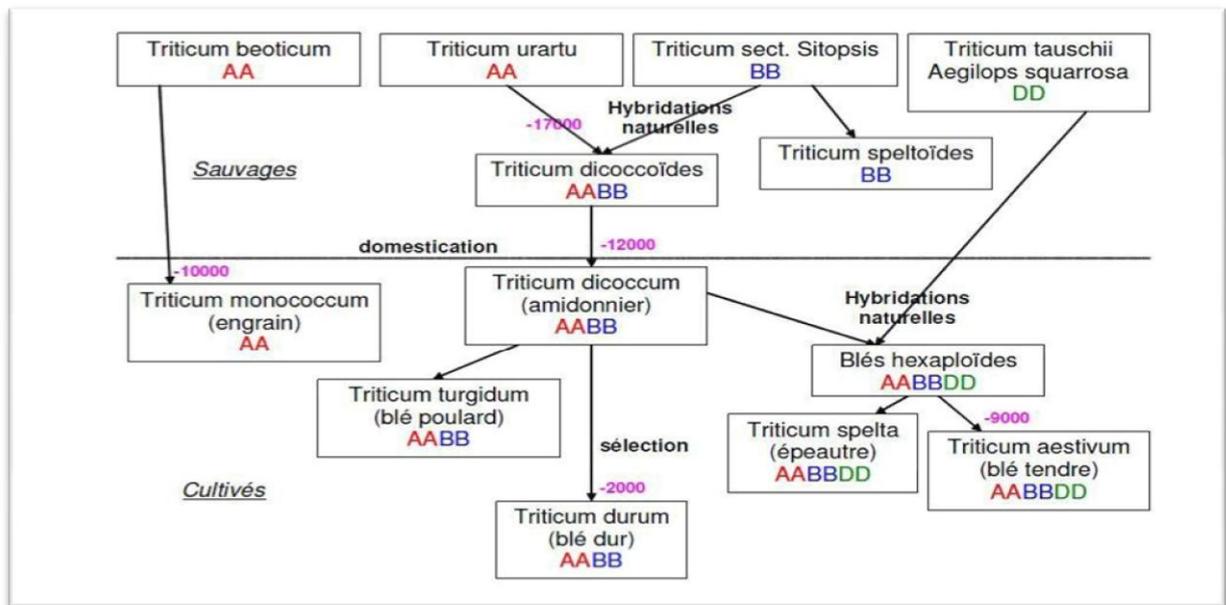
Figure 01 : Origine et diffusion de *Triticum turgidum*(Bonjean, 2001).

## I.2. Origine génétique de blé dur

Selon Cook et al., (1991) ; Boulal et al., (2007) et Salamé(2012) certains premiers blés cultivés constituent le genre *Triticum*, qui comporte un certain nombre d'espèces cultivées. Du point de vue génétique on peut les classer :

- Le groupe diploïde ( $2n = 14$  chromosomes) ou groupe de *Tritium monococcum*.
- Le groupe tétraploïde ( $2n = 28$  chromosomes) ou groupe de *Triticum dicoccum*.
- Le groupe hexaploïde ( $2n = 42$  chromosomes) ou groupe de *Triticum sativum*.

Ainsi l'origine du blé dur est issue de deux hybridations interspécifiques suivies d'un doublement chromosomique. Le croisement entre *Triticum monococcum*(A) et un *Aegilops* (B) a donné un individu de structure génomique (AB) avec 14 chromosomes (figure 02). Après doublement chromosomique est apparu *Triticum turgidum* sp. *dicoccoides*(AA BB) ancêtre du blé dur, qui a ensuite progressivement évolué vers *Triticum turgidum* sp. *dicoccum* puis vers *Triticum durum*(blé dur cultivé) (Chapman, 2009).



**Figure 02 :** Origines et généalogie du blé (Naville, 2005).

### I.3. Classification botanique

Le blé dur (*Triticum turgidum durum*) est une plante annuelle de la classe monocotylédone, la famille des Graminées (Gramineae = Poaceae). La classification du genre *Triticum* a connu plusieurs controverses (Caligari et Brandham, 2001). Le nombre exact d'espèces du genre *Triticum* n'est pas définitivement déterminé puisqu'il existe de nombreuses propositions de classification dont les unes considèrent certains taxons comme des espèces (Khalighi et al., 2008).

Selon Clech (2000) ; Feillet (2000) et Naville (2005) la taxonomie de blé dur est établie comme suit :

**Règne :** plante

**Embranchement :** Spermaphytes

**Sous-embranchement :** Angiospermes

**Classe :** Monocotylédones

**Ordre :** Poales

**Famille :** Poacées (Gramineae)

**Genre :** *Triticum* sp

**Espèce :** *Triticum turgidum* subsp. *Durum*

**Nom commun :** Blé dur

#### I.4. Importance et production du blé

##### ➤ Dans le monde

Le blé est cultivé largement dans le monde sous des conditions climatiques diverses et a été la denrée alimentaire de base pour la plupart des civilisations en Europe, Asie et Afrique du Nord pendant 8 000 ans.

La production mondiale de blé pour 2017-2018 est 760.0 millions de tonnes par contre 761.4 millions de tonnes à campagne 2016-2017 (FAO, 09 mai 2019).

Selon les statistiques de FAO, l'estimation de la demande mondiale de blé pour la campagne 2018-2019 est 730.4 million de tonne. Les prévisions précédentes pour la production mondiale de blé en 2019-2020 s'établissent à 767.0 millions de tonnes et la dernière prévision est 769.5 millions de tonnes. Les stocks, utilisation, production et commerce du blé au niveau mondial sont résumés en le tableau I suivant :

**Tableau I:** Le marché mondial du blé.

Marché mondial du blé						
	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019 estimation	2019-2020 prévision	
					Précédente (09 mai 2019)	Dernière (06 juin 2019)
.....million de tonnes.....						
Production 1	736.8	761.4	760.0	730.4	767.0	769.5
Disponibilités 2	962.5	1002.6	1022.4	1012.3	1035.2	1037.9
Utilisation	715.5	735.7	738.5	746.4	756.9	755.0
Commères 3	167.3	176.9	177.3	168.4	173.5	174.0
Stocks de clôture 4	241.3	262.4	281.9	268.4	278.0	280.8

Source : FAO, 2019.

##### ➤ En Algérie

La céréaliculture constitue en Algérie la principale activité, notamment dans les zones arides et semi arides, le blé dur occupe une place centrale dans l'économie Algérienne (Cadi, 2005). Les superficies emblavées en céréales ont été de 3,44 millions d'hectares pour la

campagne labours-semailles 2017-2018. Ces superficies emblavées se répartissent entre 1,6 million d'hectares (ha) de blé dur, 480.000 ha de blé tendre, 1,28 million ha d'orge (FAO, 2017).

Durant de la saison 2017/2018, l'Algérie devrait produire un volume total de blé et l'orge de 3.5 MT, 2.5 MT de blé et 1 MT d'orge, indique le Département américain de l'agriculture. Le besoins de consommation en Les céréales, le pays devrait compter sur des importations de 8,2 MT de céréales ce qui confirmera son rang de troisième importateur mondial, derrière l'Egypte et l'Indonésie.

Algérie a importé de l'Europe : 22,9 MT en 2018-2019 et 24.2 MT de céréales durant de la campagne 2017/2018, selon les services douaniers français (UNIGRAINS, 2019). Les importations au cours des dix premiers mois de l'année 2017 ont atteint 1.39 MT (404.20MUSD) contre 1.40 MT (435.80 M USD) en 2016, soit une diminution de 2 en quantité et 7 en valeur. Pour le Blé tendre, l'Orge et le Mais, leur données figurent sur le tableau II (CNIC, 2017).

**Tableau II** : Bilan des importations de l'Algérie des principales céréales.

	Millions Tonnes (janvier-septembre)		Evolution en quantité % T	Millions USD (janvier-septembre)			Evolution en valeur % USD
	2016	2017			2016	2017	
Blé dur	1,40	1,39	-2	Blé dur	435,80	404,20	-7
Blé tendre	4,57	4,64	2	Blé tendre	875,00	828,70	-5
Orge	0,76	0,42	-45	Orge	134,70	76,29	-43
Mais	3,20	3,04	-6	Mais	600,40	579,00	-4

Source : ONFAA à partir des données CNIS, (2017).

## II.1. Les stress

Le stress est un ensemble de condition qui provoque des changements de processus physiologique résultant éventuellement en dégâts dommages, blessures, inhibition décroissance ou de développement de la plante (**Menacer, 2007 ; Kherfi et Brahmi, 2011**).

## II.2. Les catégorie de stress

### II.2.1. Stress biotique

Dus à une agression par un autre organisme vivants: insectes, animal,...Etc (**Kazi et al., 2013**).

#### II.2.1.1. Les maladies principales du blé dur

Le blé peut être attaquée par de multiple maladies durant son cycle de développement, et peut subir des pertes de rendement importantes, surtout lorsque la variété utilisée est sensible et que les conditions de l'environnement sont favorables au développement des agents pathogènes et particulièrement les agents cryptogamiques qui causent des dégâts importants (**Aouali et Douici-Khalfi, 2013**).

**Amrani (2013) ; Brunner et al., (2013)** les principales maladies du blé dur sont :

- ✓ **L'Oïdium** (*Erysiphegraminisf.sp.tritici*).
- ✓ **La Fusariose** (*FusariumroseumetMicrodochiumnivale*).
- ✓ **La Septoriose**(*Septoriatritici et la Septorianodurum*).
- ✓ **Piétin verse** (*Tapesiayallundae et Tapesiaacuformis*).
- ✓ **La Rouille jaune** (*Puccinia striiformisf.sp. Tritici*).
- ✓ **La Rouille brune**(*Puccinia reconditaf.sp.tritici*).

### II.2.2. Stress abiotique

Les plus importantes de ces contraintes , suite aux rôles majeurs qu'elles jouent dans les fonctions essentielles de la plante, sont la variation de la précipitation , de la température , de l'humidité du sol et de l'air ambiant, de la salinité, certains stades végétatifs sont particulièrement sensibles à ces contraintes abiotiques donc les stress se traduisent chez les

plantes par des changements morphologiques, physiologiques et moléculaires qui affectent leur croissance et leur productivité (**Wangxia et al., 2003**).

### II.2.2.1. Les type de stress abiotique

#### II.2.2.1.1. Le stress thermique

La variation des températures affecte, au même titre que le manque d'eau, la croissance et le développement de la plante. Certains stades végétatifs et périodes du cycle de développement sont particulièrement plus sensible à ces événements climatiques (**Gate et al ; 1997 ; Mekhlouf et al., 2006**).

Le stress thermique est défini par un déséquilibre physiologique suite à la hausse ou la baisse de températures, ces dernières lorsqu'elles durent a un temps suffisant endommagent irréversiblement la croissance ou le développement des plantes. Les plantes peuvent être endommagées de différentes manières, soit par des températures basses ou élevées du jour ou de nuit, par l'air chaud ou froid ou par les températures élevées du sol.

La contrainte thermique est une fonction complexe qui varie selon l'intensité, la durée et les taux d'augmentation ou de diminution de la température (**Oukarroum, 2007**). La température optimale pour le développement et le remplissage du grain des céréales d'hiver varie de 12 à 15 C° (**Wardlawetal., 1994**). Une diminution de 3 à 5% du poids du grain pour chaque degré centigrade d'augmentation de la température à partir de la base des 15°C, est notée (**Wardlawetal., 1994**).

#### II.2.2.1.2. Le stress salin

Selon **Munns et al., (2006)** la salinité représente l'accumulation des sels dissous dans la solution du sol à un niveau qui inhibe la croissance et le développement des plantes. On compte généralement deux formes de salinité : primaire et secondaire.

Le stress salin est une brusque augmentation de la concentration en sels qui conduit d'un part, un afflux plus élevé d'ions dans la cellule suite à la chute de la concentration du milieu externe, d'autre part, à une perte d'eau par voie osmotique. Une abondance de sels dissous s'observe bien sur en milieu marin, mais aussi dans beaucoup de milieux terrestres (**Ben Hebireche et Djafour, 2011**).

### II.2.2.1.3. Le stress hydrique

Le manque d'eau, déficit hydrique ou la sécheresse représente le stress abiotique le plus sévère, auquel la culture du blé dur fait face dans les conditions de productions des zones arides et semi- arides (**Chennafi et al.,2006**).

Le stress hydrique peut se définir comme le rapport entre la quantité d'eau nécessaire à la croissance de la plante et la quantité d'eau disponible dans son environnement, sachant que la réserve d'eau utile pour la plante est la quantité d'eau du sol accessible par son système racinaire (**Laberche, 2004**).

La demande en eau de la plante est quant à elle déterminée par le niveau de transpiration ou évapotranspiration, ce qui inclut les pertes d'eau tant au niveau des feuilles qu'au niveau du sol (**Laberche, 2004**). L'adaptation est un mécanisme nécessaire pour les variétés à adopter dans les régions arides et semi- arides, pour tolérer la sécheresse (**Slamaetal.,2005**).

#### II.2.2.1.3.1. Les effets de stress hydrique

Ce stress se traduit par une série de modification qui touche les caractèresmorphologiques, physiologiques et biochimiques, à partir du moment où les besoins en eau de la plante sont supérieurs aux quantités disponibles (**Mefti et al., 2000**).

L'effet de ce stress dépend de son degré, sa durée, du stade de développement de la plante, du génotype et son interaction avec l'environnement (**Yokotaet al.,2006**).

#### ❖ La photosynthèse

Parmi les modifications physiologiques liées au stress hydrique, la régulation stomatique qui influe sur la photosynthèse et la respiration, est la plus importante. Plusieurs travaux permettent de voir comment les organes végétaux sont affectés par le manque d'eau.

La baisse du potentiel hydrique de la plante se traduit principalement par une diminution de la pression de turgescence puis une régulation stomatique. Donc un stress hydrique, en provoquant la fermeture des stomates se traduit par unralentissement de la

photosynthèse en même temps que la transpiration (Teulat et al., 1997). La sécheresse menace la capacité de la plante à maintenir sa photosynthèse (Escalona et al., 2012).

#### ❖ L'alimentation minérale

Le déficit hydrique induit un déficit de nutrition azotée qui provient principalement des réductions de flux d'azote au niveau des racines et de la réduction des échanges entre les parties aériennes et racinaires du fait de la chute de la transpiration (Dugo, 2002).

Le facteur d'aridité peut affecter la nutrition phosphatée dans les zones semi-arides en réduisant de manière drastique les possibilités de désorption des ions phosphate depuis la phase solide du sol et de leur transfert vers la racine. En effet 95% du phosphore prélevé doit être désorbé avant d'être transféré vers la plante (Dugo, 2002).

#### ❖ La croissance des organes reproducteurs

De la même manière que pour les organes végétatifs, la croissance des jeunes organes reproducteurs (ovules, fleurs puis graines) ainsi que leur nombre (défini par des processus de ramification) sont limités en cas de déficit hydrique. Il en résulte une réduction du nombre de grains, qui aura un effet sur le rendement même si les conditions hydriques redeviennent favorables (Sahraoui, 2011).

#### ❖ La croissance végétative

En effet, l'eau joue un rôle essentiel dans la croissance et le développement de la culture du blé dur. Le manque d'eau se traduit par une réduction de la croissance de la plante et de sa production par rapport au potentiel du génotype (Sahraoui, 2011).

Un manque d'eau précoce affecte principalement la croissance importante de la taille, de la longueur des entre nœuds, du nombre de feuilles voire de la surface foliaire et des racines (Attia, 2007). Les plantes soumises à un déficit hydrique voient généralement leur sénescence foliaire s'accélérer; et une perte trop importante d'eau peut conduire à la mort des cellules (Bouchabke et al., 2006).

### ❖ Le rendement et la composition du grain

Selon le positionnement dans le cycle de développement et l'intensité de la contrainte hydrique, les stress hydriques influencent les rendements ainsi que la composition biochimique des graines. Un déficit hydrique après la fécondation réduit la taille des organes et s'il se poursuit pendant la phase de remplissage, il affecte leur composition.

Les différents métabolismes étant inégalement affectés par le déficithydrique (le métabolisme carboné l'est davantage que le métabolisme azoté), les concentrations relatives des différents composés sont modifiées : un manque d'eau induit généralement une baisse des teneurs en amidon et en huile des graines, et une augmentation des teneurs en protéines (**Hireche, 2006**).

Le déficit hydrique, de nature intermittente, est une des principales causes des pertes de rendement du blé dur, pouvant aller jusqu'au sinistre total. Il affecte toutes les composantes du rendement et en particulier le nombre de grains par épi et le poids moyen du grain (**Chennafi et al., 2006**). Ceci se répercute sur le rendement économique de la culture, qui peut baisser de plus de 80% (**Sahraoui, 2011**).

#### II.2.2.1.3.2 Les stratégies d'adaptations au stress hydrique

L'adaptation d'une plante à une contrainte hydrique peut être définie, du point de vue physiologique, par sa capacité de survivre et à s'accroître et du point de vue agronomique, par l'obtention d'un rendement plus élevée que celui des plantes sensibles (**Madhavaet al., 2006**).

Pour lutter contre le manque d'eau, les plantes développent plusieurs stratégies adaptatives qui varient en fonction de l'espèce et des conditions du milieu par plusieurs mécanismes de résistances Esquive, évitement et tolérance (**Bennaceur et al., 2001 ; Bouatrous et al., 2009**). Ces dernières interagissent pour permettre le maintien de la croissance, du développement et de la production (**Passioura, 2004**).

##### II.2.2.1.3.2.1. La stratégie d'esquive

L'esquive du stress, la plus rencontrée et utilisée en amélioration des plantes, est certainement la précocité ou le raccourcissement de la durée du cycle de développement, qui

est d'un avantage certain dans les milieux où le stress est plus intense vers la fin du cycle de la culture (**Richards *et al.*, 2002; Mekhlouf *et al.*, 2006; Rebetzke *et al.*, 2007; Hadad, 2009**).

L'exploitation de l'esquive comme stratégie d'adaptation aux stress s'est faite dans le contexte agricole en cherchant à faire coïncider le développement de la culture ou du moins les phases les plus sensibles avec les périodes où le stress est moins intense (**Witcombe *et al.*, 2009**).

Ceci s'est fait par des études de l'influence de la variabilité de la durée des phases de développement sur la productivité de la plante, dans le but de déduire la durée la plus optimale pour que les stades sensibles puissent se réaliser à des périodes où les risques de stress sont moins pénalisants (**Witcombe *et al.*, 2009**).

#### **II.2.2.1.3.2.2. La stratégie d'évitement**

Cette stratégie consiste à empêcher que la plante soumise à des conditions hydriques défavorables ne subisse un stress hydrique trop important. Ces adaptations réduisent le risque de perte de rendement, mais ont le plus souvent un coût en terme de rendement maximum (**Jean-pierre *et al.*, 2006**).

La stratégie d'évitement permet à la plante de traverser des périodes de sécheresse en privilégiant la limitation de la perte en eau, ce qui restreint la chute de potentiel hydrique des tissus. Les pertes d'eau peuvent être minimisées à court terme par le contrôle de la transpiration par la régulation stomatique et, à plus long terme, par la diminution du rayonnement absorbé grâce à l'enroulement des feuilles, au développement d'une couche dense de trichomes ou à la modification de l'angle des feuilles (**Larcher, 2000**).

Elle résulte aussi à plus long terme de la réduction de la surface foliaire et de l'arrêt de croissance (**Chaves *et al.*, 2003**). De plus, l'absorption d'eau est maximisée en favorisant l'allocation de ressources au profit de la prospection racinaire qui se traduit par un accroissement du root/shoot ratio. Cette stratégie « économe en eau », bien que favorable au maintien du statut hydrique du végétal, est pénalisante pour le gain de carbone (**McDowell *et al.*, 2008**).

### II.2.2.1.3.2.3. La stratégie de tolérance

Cette stratégie consiste à maintenir les fonctions de la plante, croissance, transpiration et la photosynthèse, malgré le déficit hydrique (**Jean-pierre et al., 2006**).

La tolérance à la déshydratation implique des mécanismes intracellulaires qui visent à préserver l'intégrité structurale et fonctionnelle des tissus lorsque le potentiel hydrique diminue (**Laurent et Sané, 2007**). Dans le cas d'un abaissement du potentiel hydrique, s'exprime par un maintien de la turgescence (**Garg et al., 2002 ; Moinuddin et al., 2005**) grâce au phénomène d'ajustement osmotique.

La proline est l'un des solutés compatibles le plus fréquemment accumulé en réponse à des contraintes environnementales variées et joue un rôle important dans la tolérance des plantes (**Ben Rejeb et al., 2012**).

L'accumulation de la proline constitue aussi un véritable mécanisme de tolérance à la salinité et la déficience en eau (**Slama et al., 2004**). En effet, la teneur en proline est plus élevée en cas de déficit hydrique et, en particulier, chez les génotypes les plus résistants à la sécheresse (**Salama, 2000**).

L'existence chez les céréales d'une variation intra-spécifique pour l'accumulation de la proline sous l'effet du déficit hydrique suggère la possibilité d'une sélection, sur la base de ce caractère, des génotypes qui auront une bonne capacité à survivre et un rendement en grains stable en conditions hydriques limitant (**Bergareche et al., 1992**).

L'accumulation des sucres solubles est un moyen adopté par les plantes en cas de stress, afin de résister aux contraintes du milieu (**Mouellef, 2010**). L'accumulation des sucres solubles peut résulter d'une augmentation de l'hydrolyse de l'amidon puisqu'ils ont enregistré, simultanément, une diminution de l'amidon et une accumulation de sucres solubles dans les tissus stressés (**Bouchelaghem, 2012**).

### III.1.Modèle et modélisation

Dans le cadre de la modélisation, le système étudié est appelé système primaire. Un modèle est une représentation de la réalité et le modèle est appelé système secondaire. Par définition un modèle est une simplification de la réalité car s'il en avait tous les attributs, il s'agirait non plus d'un modèle mais de la réalité (**Toutain et Bousquet-Mélo.,2007 in Moumni 2013**).

#### III.1.1.La Modélisation

C'est l'opération de construction d'un modèle. L'élaboration d'un modèle est motivée par un ensemble des questions auxquelles ce modèle doit contribuer à répondre. Elle se traduit par un choix, celui des variables que le concepteur jugera importante (**Baron,2007 in Moumni 2013**).

#### III.1.2. Le Modèle

Un modèle est une représentation partielle du fonctionnement d'un système (**Baron,2013 in Moumni 2013**).Dans le domaine scientifique, un modèle est donc une construction matérielle ou abstraite « ressemblant » à l'objet modélisé, selon un certain nombre de caractéristiques pertinentes au regard des données disponibles et de l'objectif poursuivi(**Sanchez et Prieur.,2005 in M'Hamadia et Lamri, 2015**).

#### III.1.3.L'objectif de modèle

Schématiquement, la modélisation peut avoir trois objectifs :

- a- Décrire (résumer) les données.
- b- Prédire (simuler), c'est-à-dire faire des inférences.
- c- Expliquer (comprendre), c'est-à-dire avoir des objectifs mécanistiques.

Selon que l'on souhaite parvenir à l'un ou l'autre de ces objectifs, la modélisation sera réalisée selon des modalités différentes (**Toutain etBousquet-Mélo, 2007 in Ghodbane et Meguellati, 2017**).

### III.1.4. Les étapes de la modélisation

Selon **Toutain et Bousquet-Mélo(2007) in Ghodbane et Meguellati (2017)** La modélisation se déroule en 5 grandes étapes :

- a- On se fixe les objectifs de la modélisation.
- b- On fait l'inventaire des informations :
  - Données externes (loi, théorie, bibliographie).
    - axiomes (vérités indémontrables).
    - hypothèses.
  - Données expérimentales.
- c- On réalise un modèle (spécifications, construction en fonction des axiomes et hypothèses).
- d- On identifie les paramètres du modèle.
- e- On valide en confrontant le modèle à la réalité.

On tire des conclusions compte tenu des interactions entre ces différentes étapes, le processus est itératif.

### III.1.5. La modélisation agronomique

Pour évoluer vers une agriculture plus durable, il est nécessaire de concevoir des nouveaux systèmes de culture répondant au mieux à la multiplicité des objectifs, économiques, environnementaux et sociaux. La modélisation est devenue l'outil incontournable qui permet de connaître, comprendre, inventer et partager ces nouvelles manières de produire (**Mollier et al., 2013**).

La recherche agronomique utilise de nombreux modèles déterministes pour décrire le développement de cultures (**Dickenstein et Emiris, 2005**).

Dans les régions où les conditions environnementales rendent les décisions de production incertaines, les modèles ont été utilisés avec succès pour analyser les pratiques agronomiques (**Lyon et al., 2003**).

### III.2. Modèle de culture

Le développement de l'informatique a permis l'essor des « modèles de culture », reproduisant le comportement d'une culture et sa réponse à diverses contraintes du milieu modulées par des actes techniques (**Affholder, 2001**).

Les modèles des cultures, nés il y a 25 ans, sont très utilisés en agronomie (**Brisson, 2002**). Ils simulent le fonctionnement dynamique du système sol-couvert végétal, dont le pas de temps est le plus souvent journalier, c'est-à-dire qu'ils décrivent l'état du système chaque jour (**Barbottin, 2004**). Les premiers travaux dans ce domaine ont porté sur la simulation des flux hybrides dans le système sol-plante-atmosphère, dans le but d'optimiser la gestion de l'irrigation (**Hanks et al., 1969**).

#### III.2.1. Définition

L'ensemble sol-couvert végétal constitue le système modélisé (**Garcia, 2006**). L'atmosphère au voisinage du système est en général appréhendée comme la condition limite supérieure et représentée par un ensemble de variables climatiques issues de mesures standards (stations météorologiques) ayant une fonction de forçage (**Brisson et al., 2005**). Les éléments constitutifs des deux sous-systèmes sol et couvert végétal varient entre les modèles selon leur genèse et leurs objectifs (**Brisson et Delecote, 1991**).

En interaction avec le système, les modèles prennent en compte les actions techniques de l'agriculteur ; leur résolution spatiale correspond au plus petit élément pour lequel on peut définir de façon déterministe un milieu physique et un itinéraire technique (**Barbottin, 2004**).

#### III.2.2. Histoire des modèles de culture

La naissance des modèles de culture correspond à une valorisation des travaux sur la photosynthèse et la respiration (**de Wit et al., 1970**) avec une mise en relation entre la biomasse accumulée et les processus instantanés. 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.

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. L'école américaine, avec les modèles GOSSYM / GLICYM (Whisler et al., 1986, McKinion et al., 1988), CERES (Ritchie et Otter, 1985) dont dérive le modèle australien APSIM (McCown et al. 1996) et la famille de modèles CROPGRO (Boote et al., 1998, Jones et al., 2002), s'est approchée d'objectifs agronomiques et a commencé à introduire les pratiques agricoles. Dans le même temps, EPIC (Williams et al., 1984), le premier modèle générique, est développé pour répondre à des préoccupations agroenvironnementales ; il a donné naissance à CROPSYST (Stockle et al., 1994).

Au début des années 1990, des modèles à vocation uniquement environnementale apparaissent comme par exemple DAISY (Hansen et al., 1990). La tendance actuelle est à la mise au point de modèles génériques et agro-environnementaux, qui prennent en compte l'effet des pratiques : c'est le cas de STICS (Brisson et al., 1998, 2003, 2009), modèle développé à l'INRA depuis 1996.

### III.2.3. Les groupes majeurs de modèle

**Bouman et ses collaborateurs (1996)** font le classement de trois groupes majeurs de modèles :

- Le groupe de modèles américains (IBSNAT) *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer* (Uehara et Tsuji, 1993) ce projet qui a produit la fameuse famille des modèles CERES.

- Le groupe de modèles australiens qui a développé le simulateur de système de production agricole (APSIM) (*The Agricultural Production system SIMulator*) (McCown et al., 1995).

- Le groupe de modèles hollandais qui a développé une famille décrite par **Van Ittersum et ses collaborateurs (2003)**. Ces dernières années, une série de nouveaux modèles est apparue et utilisée d'une manière croissante tel que CropSyst (Stöckle et Nelson, 1999; Stöckle et al., 2003), STICS développé par l'INRA 1996. Dans notre étude, nous essayons de tester un modèle informatique « **Acquacrop** ». L'intérêt de ces modèles est lié à leurs possibilités de représenter quantitativement, l'action combinée et dynamique des différents facteurs environnementaux sur le fonctionnement de l'ensemble de la culture.

### III.2.4. La structure générale des modèles de culture

Les modèles de culture comprennent un ensemble de variables d'entrée (climat, journalier, techniques culturales, état initial du système au démarrage de la simulation,...etc), et de variables de sortie (à la fin de la simulation) comme le rendement à la récolte, l'efficacité d'utilisation de l'eau ou de l'azote au cours du cycle de culture, entre autre (Affholder, 2001).

➤ **Les différents types de modèles :**

Selon la nature des variables d'état décrites dans le modèle (température, indice de nutrition azotée, réserve en eau du sol) et les équations mathématiques simulant leur évolution, on distingue les modèles de type « mécaniste » et les modèles de type « empirique »

- ✓ Les modèles de type « **mécaniste** », décrivent et quantifient chaque processus, sur des bases physiques ou physiologique, c'est-à-dire que les équations décrivent finement les processus tels que la respiration, la croissance et le développement de chaque organe.
- ✓ Dans les modèles de type « **empirique** », (descriptive, prédictive model) décrivent quant à eux l'évolution du système au travers des relations simplifiées entre les différentes variables sans fournir d'explications sur le fonctionnement biologique ou physique. Les équations décrivant les relations sont le plus souvent obtenues à partir d'ajustements statistiques entre les différentes variables d'état mesurées.

### III.2.5. Les domaines d'utilisation des modèles de culture

Les modèles de culture rencontrés dans la bibliographie consistent à utiliser les variables simulées comme un outil de prédiction de la stabilité des génotypes pour des variables d'intérêt. Ainsi, **Mavromatis ses collaborateurs(2001)** dans une étude sur différents génotypes de soja ont montré qu'il était possible, à l'aide d'un modèle de culture, de reproduire non seulement l'effet de l'interaction entre des caractéristiques génotypiques et l'environnement, mais de classer correctement les différents génotypes sur les environnements testés et de mesurer l'interaction de façon similaire au réel.

L'effet des caractéristiques variétales sur la production a été récemment proposé par certains modélisateurs comme une piste de travail intéressante, afin d'identifier les

facteurs d'adaptabilité pour le rendement ou pour toute autre composante d'intérêt (**Shorteret al., 1991 ;Saulescuet Kronstad, 1995**).Cependant l'utilisation d'un modèle de culture avec un outil de sélection permet d'étudier l'effet de gènes associés à des caractères phénotypiques sur des caractères d'intérêt tels que le rendement, sous l'influence de l'environnement (**Chapman et al., 2003**).

### I. Matériels et Méthodes

#### I.1. Les sites de l'expérimentation

Le choix de la zone agricole est une étape importante dans la culture du blé. Elle conditionne en effet le niveau de rendement espéré, la qualité de la récolte et finalement le produit brut attendu par la culture.

L'étude a été faite pendant La campagne agricole : 2015/2016 au niveau de deux champs expérimentaux en région semi aride:

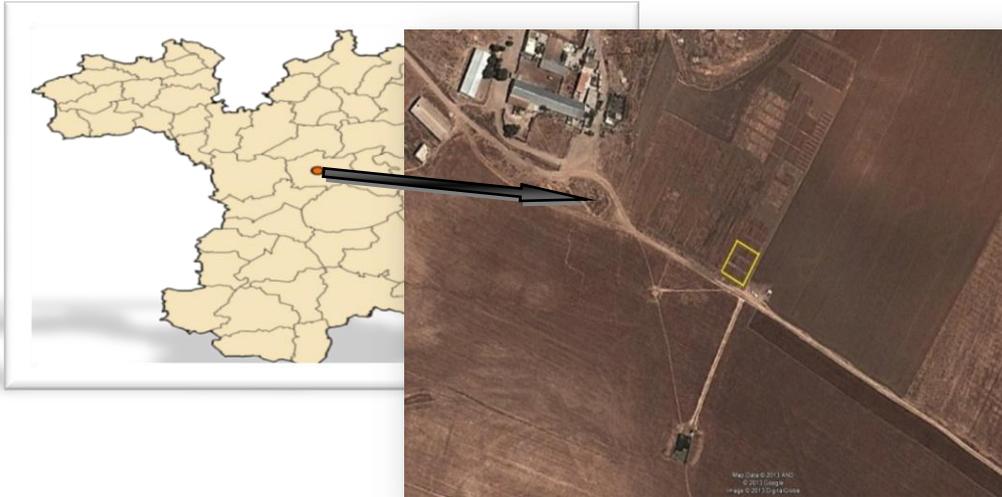
❖ La première expérimentation a été conduite sur la station expérimentale INRAA (l'Institut National de Recherche Agronomique d'Algérie) Sétif (**Trirat et Maàdadi, 2015-2016**).

❖ La deuxième expérimentation a été conduite dans une ferme privée à la région de Chenia proche de Bordj Ghedir (Bordj Bou Arreridj) (**Far et Siouda, 2015-2016**).

#### I.2. Présentation des régions d'étude

**Région 1** : l'institut national de recherche agronomique d'Algérie (INRAA) de Sétif.

Position géographique du site :  $36^{\circ} 15' N$  et  $5^{\circ} 37'$  de longitude (E), altitude : 970m. Le climat est de type semi-aride supérieur (400-500mm par an) la plus grande partie des précipitations a lieu pendant les mois d'hiver et seulement une partie minimale est répartie sur le reste des mois de la campagne. Ce climat est caractérisé par des vents chauds et secs et par des températures estivales de l'ordre de  $35^{\circ}C$  (Figure 03).



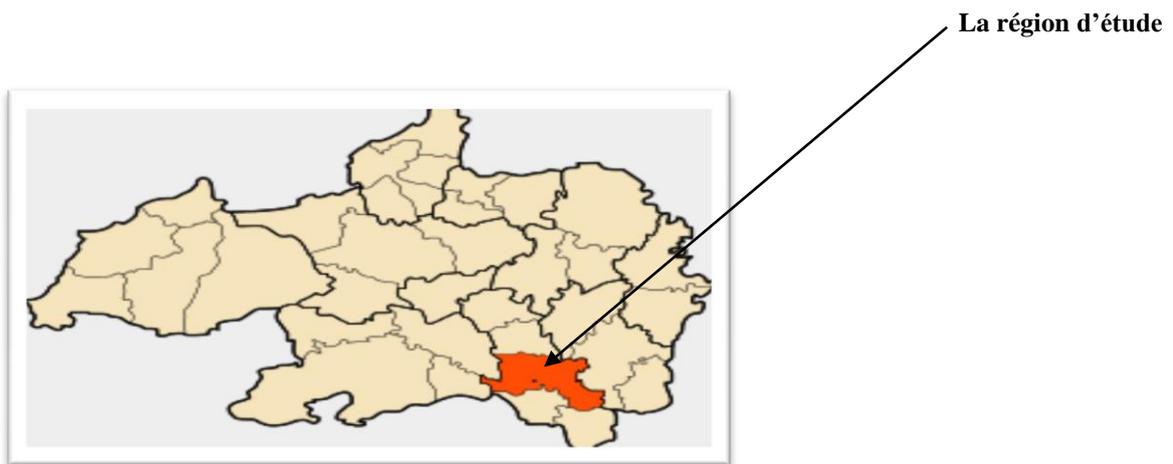
Wilaya de Sétif

**Figure 03:** Situation du site de l'expérimentation **Source:** map Oata 2013.

Les sols de la station sont localisés dans la petite vallée d'Oued Bousselem. Ils sont argilo-limoneux, de pH alcalin, avec une teneur en calcaire total, supérieure à 35%. Le sol du site expérimental se caractérise par une capacité au champ de 25%, un point de flétrissement de 12% et une densité apparente de 1,35 g/cm.

**Région 2 :** Chania de Bordj Bou Arreridj

Position géographique du site : 35° 54' N et 4° 53' de longitude (E), latitude : 1032 m. Cette région appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride supérieur (200-400mm/an), caractérisée par un climat continental (Figure 04). Les températures sont basses au l'hiver et les précipitations abondantes sous forme de neige et de pluie, notamment pendant les mois de novembre, février et mars. L'été y est très chaud et les températures peuvent dépasser les 30 degrés. Le sol du site expérimental, de nature argileux.



**Figure 04 :** Localisation de la commune de Bordj Ghedir (Chania) dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj.

### I.3. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé de la saison 2015-2016 est constitué de quatre variétés de blé dur (*Triticum durum*) d'origine différente : deux issus de sélection CIMMYT/ICARDA et deux variétés locale (Tableau III). Les variétés sont Oued Zenati, Bousselem, Mexicali 75, Altar 84.

**Tableau III :** L'origine de quatre variétés de blé dur.

N°	Variété	Code	Origine
1	<b>Oued Zenati</b>	OZ	Variété locale lancée en 1936
2	<b>Bousselem</b>	BSS	Sélectionné localement, à partir de CIMMYT/ICARDA
3	<b>Altar 84</b>	ALT 84	Variété CIMMYT lancée en 1984
4	<b>Méxicali 75</b>	MX 75	Variété CIMMYT lancée en 1975

Source : CNCC (2015)

### I.4. La description des variétés

- **Mexicali 75**

Est une variété CIMMYT, elle est caractérisée par sa précocité et par son grain allongé, qui le rend légèrement sensible à la moucheture et au mitadinage. Elle est très productive avec une stabilité du rendement élevée, adaptée aux Hauts plateaux et zones sahariennes (**Ait –kaki, 2008**).

- **Oued Zenati**

Est une sélection locale faite à l'intérieure du matériel introduit de l'ITGC (Station de Guelma/1936.). C'est une variété tardive, avec un rendement moyenne. Adapté aux plaines intérieures, son épi est blanc, compact à barbes noirs et longues, sa paille est haute et pleine, le grain est ambré, gros et peu allongé, le PMG est élevé. C'est une variété tardive dont le tallage est moyen, tolérante à la Septoriose sensible aux rouilles brunes et jaunes et à la fusariose (**Bouthiba et Debaeke, 2001**).

- **Bousselem**

Sélectionné localement, à partir de CIMMYT/ICARDA, c'est une variété haute de paille, présentant des épis blancs, barbe noire-grise, demi-lâche, long et robuste et hauteur de la plante moyenne de 90 à 100 cm, elle se caractérise par une résistante aux maladies cryptogamiques, mais le traitement des semences aux fongicides est recommandé aussi une résistance au froid, à la verse, à la sécheresse (**Baghem, 2012**).

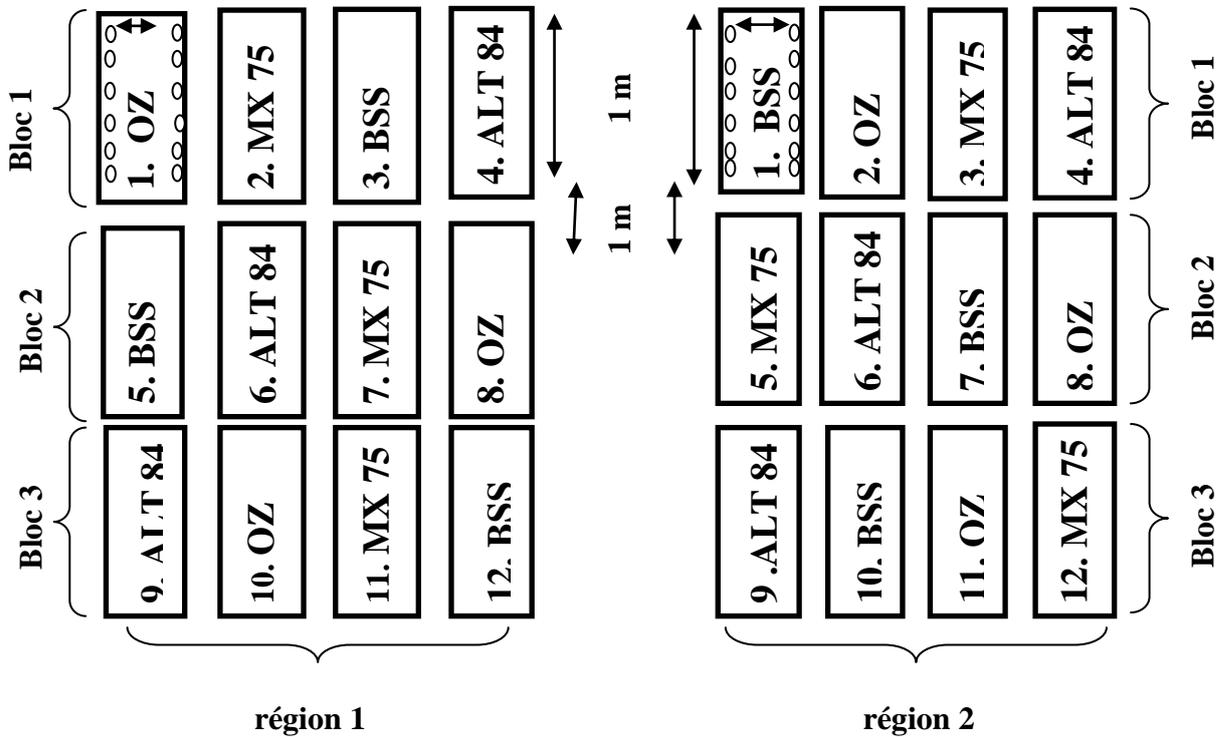
- **Altar 84**: est une variété CIMMYT Mexico 1992.

### I.5. Dispositif expérimental

L'essai est mis en place selon un dispositif en blocs complètement randomisés à 3 répétitions. L'essai est constitué de trois blocs, chaque bloc comporte deux lignes pour chaque variété (micro parcelle), l'espace entre les deux lignes (interligne) est égale à 20 cm, la longueur de chaque ligne est 1 m. l'espace entre les micros parcelles 40 cm et l'espace entre les blocs 1 m (figure 05).

Le semis a été effectué le 21 du mois de décembre 2015, avec une densité de 250 g/m<sup>2</sup>. L'essai a été mené en plein champ, donc l'irrigation est de type pluvial. Les données

climatiques durant la période de l'expérimentation, sont obtenues à partir de la station météorologique proche à chaque site expérimental.



**Figure 05** : Schéma du dispositif expérimental de l'essai en plein champ les deux régions (INRAA Sétif, Chania 2015-2016).

## I.6.AquaCrop

### I.6.1.Description de l'AquaCrop

AquaCrop est un modèle de productivité des cultures et de l'eau, développé par la Division des Terre et des Eaux de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) depuis 1998. La FAO a élaboré AquaCrop dans un effort pour augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau dans la production alimentaire (Araya et al., 2010).

Les fonctions d'AquaCrop comprennent la comparaison entre les rendements possibles et réels, le développement de programmes d'irrigation, des simulations de séquençage des cultures, des scénarios climatiques futurs, et l'interaction des basses eaux et de la fertilité sur les rendements, entre autres (FAO, 2011).

Dans AquaCrop, la transpiration est calculée, et avec l'utilisation de paramètres propres à chaque culture, la biomasse est aussi calculée (Steduto et al., 2009). Le modèle

peut être utilisé pour générer des prévisions de rendement et d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau des cultures en interaction avec les changements climatiques projetés (Araya *et al.*, 2010).

AquaCrop est un logiciel pour la simulation de la réponse productive des cultures herbacées à la disponibilité hydrique. « Le contenu d'eau dans la zone des racines est simulé à travers la quantification des flux d'eau en entrée et en sortie du système, considérant le sol comme un réservoir d'eau constitué par plusieurs couches. La réponse de la culture au stress hydrique est modulée par le développement de la couverture foliaire, la conductance stomatique, la sénescence et l'indice de récolte. La simulation de la transpiration détermine l'accumulation journalière de biomasse, au moyen de la productivité de l'eau de la culture. Ce dernier paramètre est normalisé pour l'évapotranspiration de référence et pour le CO<sub>2</sub>, permettant de faire des simulations en zones et périodes différentes, ainsi que pour des scénarios climatiques futures (figure 06). AquaCrop simule l'agriculture pluviale, l'irrigation supplémentaire, déficitaire et totale » (Steduto *et al.*, 2008).

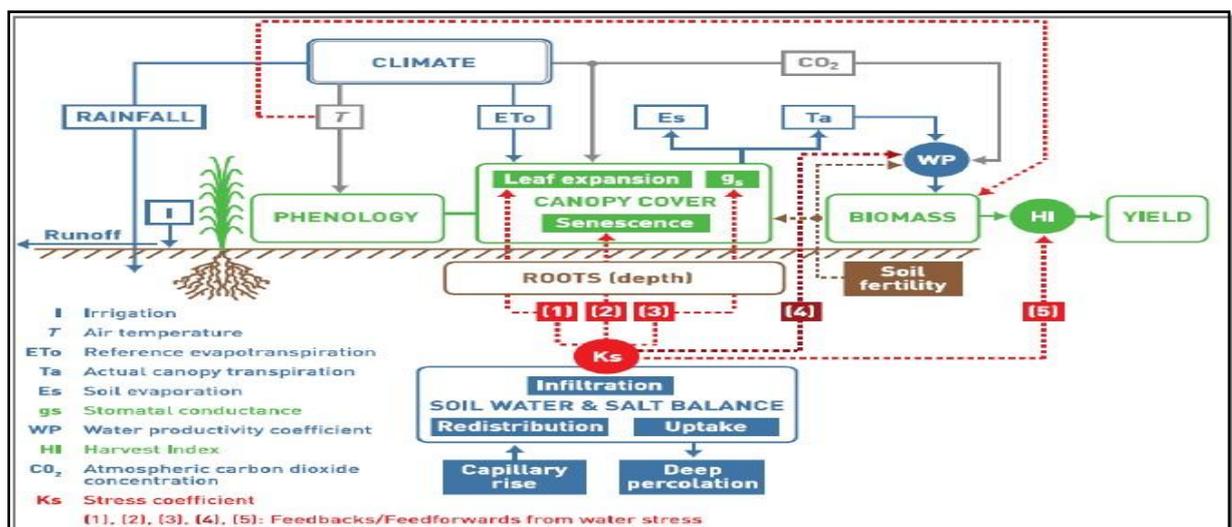


Figure 06 : Organigramme d'AquaCrop indiquant les principales composantes de la relation sol-eau-plante (Steduto *et al.*, 2008).

### I.6.2. La structure AquaCrop

Ce modèle a une structure modulaire évolutive (Figure 07). Il est organisé sous forme de plusieurs modules représentant chacun, un ou plusieurs processus liés au système sol-plante-atmosphère. Chaque module fait appel à un certain nombre de sous-programmes (ou sous-modules) traitant des mécanismes spécifiques. Le premier ensemble, intitulé «

Environnement », est composé de quatre modules, et a pour but le traitement du climat, de la culture, de la gestion et du composant sol. Le second ensemble est composé de deux modules qui décrivent la période de simulation et les conditions initiales. Enfin, le troisième ensemble, dit « projet », constitue l'étape finale du traitement des données (Aouade, 2012).

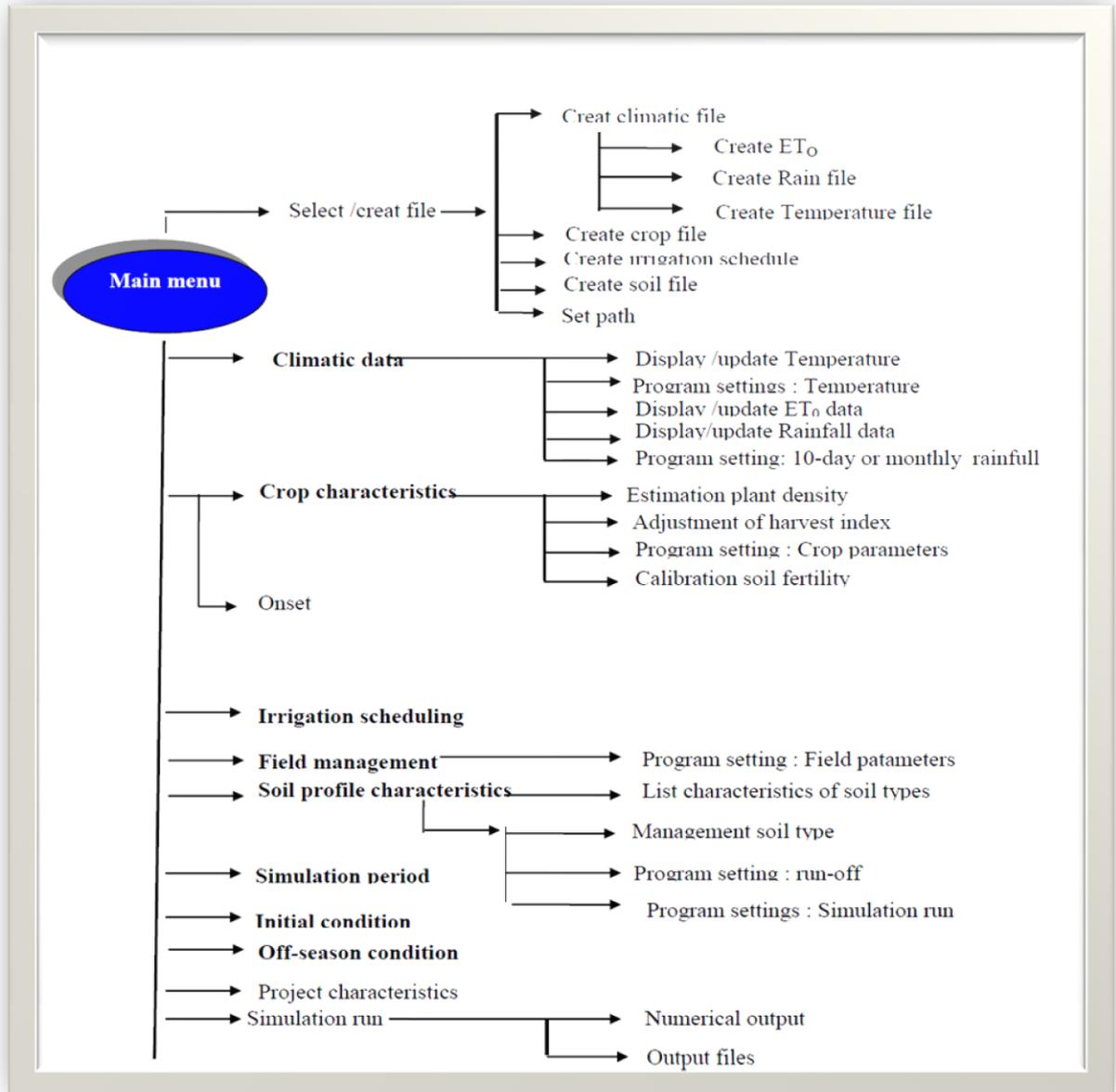


Figure 07 : Interface du modèle AquaCrop (Aouade, 2012).

I.6.3. Les données d'entrée

Aqua Crop utilise relativement un petit nombre de paramètres qui peuvent être séparés en quatre catégories (figure 08): le climat, la culture, la gestion et le sol (Raes et al., 2009).

### ➤ **Données climatiques**

Pour chaque jour de simulation, AquaCrop a besoin des températures minimale ( $T_n$ ) et maximale ( $T_x$ ) de l'air, de l'évapotranspiration de référence ( $E_{To}$ ) comme une mesure pour la demande évaporatoire de l'atmosphère, et de la pluviométrie. En plus, la concentration moyenne annuelle de  $CO_2$  doit être connue. La température influence le développement de la culture (phénologie) et si limitée la croissance et l'accumulation de biomasse. La pluviométrie et l' $E_{To}$  sont déterminants pour le calcul du bilan d'eau de la zone racinaire, et la concentration atmosphérique de  $CO_2$  affecte la productivité de l'eau de la culture.

### ➤ **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, AquaCrop 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. Grâce à l'interface utilisateur par défaut peuvent être ajustés.

### ➤ **Caractéristiques du sol**

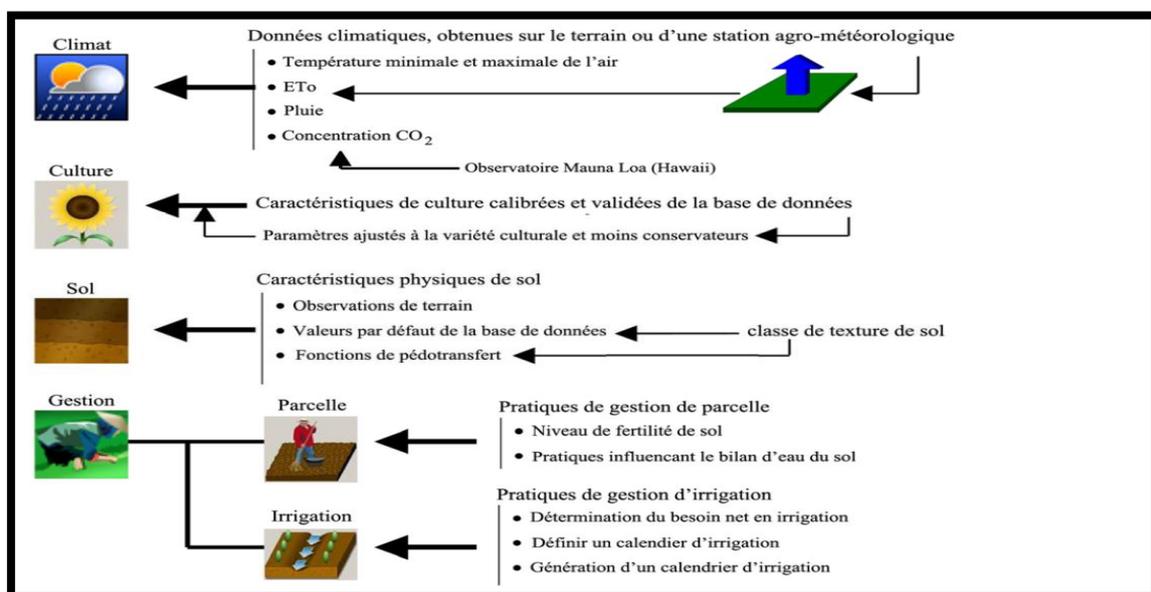
Le profil du sol peut être composé d'un maximum de cinq horizons différents de profondeur variable, chacune avec leurs propres caractéristiques physiques. Les caractéristiques hydrauliques sont considérés comme la conductivité hydraulique à saturation ( $K_{sat}$ ) et la teneur en eau du sol à saturation ( $\theta_{sat}$ ), la capacité au champ ( $\theta_{fc}$ ), et au point de flétrissement permanent ( $\theta_{PWP}$ ). 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.

### ➤ **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, dîguettes 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.

Dans la gestion de l'irrigation c'est à l'utilisateur de choisir si la culture est pluviale ou irriguée. 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 choisi à divers stades de développement des cultures.



**Figure 08** : Données d'entrée définissant l'environnement dans lequel la culture va se développer (Raes *et al.*, 2009).

### I.6.4. Données de sortie du modèle Aqua Crop :

AquaCrop génère après chaque simulation 5 fichiers de sortie qui sont:

**ProjetRun.OUT:** qui donne le résumé général des résultats de simulation.

**ProjetCrop.OUT:** qui donne le résumé des informations de simulation relatives à la culture.

**ProjetComp.OUT:** qui donne le résumé des résultats de simulation de teneur en eau relatifs aux différents compartiments de sol.

**ProjetProf.OUT:** qui donne le résumé des résultats de simulations relatives à la teneur en eau totale contenue dans le profil à différents états.

**ProjetWabal.OUT:** qui donne le bilan d'eau au niveau de la zone racinaire pour chaque jour de simulation.

### I.6.5. Calibration et validation du modèle

Nous avons utilisé principalement la « validation répliquative » qui se base sur une comparaison entre les simulations du modèle et les données expérimentales utilisées pour la calibration (*Delécolle et al., 1996*). Elle ne permet en aucun cas de caractériser la qualité prédictive du modèle, lorsqu'on utilise le modèle pour des conditions de milieu différentes de celles de la calibration.

Evaluation du modèle Aqua Crop :

La période de simulation débute le 16 décembre 2015 et se termine selon le cycle de la variété.

La calibration a porté sur les variables d'entrée relatives au sol et culture.

Pour chacun des paramètres, la valeur retenue est celle qui minimise l'erreur commise.

Les paramètres et réglages retenus de la calibration sont donnés dans le tableau IV suivant :

**Tableau IV : Paramètres utilisés dans Aqua Crop**

Paramètres	Valeur
<b>Culture</b>	
Développement	
type de plantation	Semis direct
La densité des jeunes plants	5 cm <sup>2</sup> /plants
Densité des plants	200 plants/m <sup>2</sup>
La couverture initiale de la canopée	10%
Profondeur d'enracinement maximale	1m
Couverture maximale de la canopée	90%
Declin de la canopée	Very slow decline
Productivité d'eau	13g/m <sup>2</sup>
Indice de récolte de référence	45%
Temperature	
Basse temperature	10
Température supérieure	30
<b>Stress hydrique et sols</b>	
Expansion de canopée	Modérément tolérant au stress hydrique
Fermeture des stomates	Modérément tolérant au stress hydrique
Senescence précoce	Modérément tolérant au stress hydrique
Stress d'aération	Modérément tolérant à l'exploitation de l'eau
Soil salinity stress	non considéré
Biomass production affected by soil fertility stress	non considéré

ETo calculator, version 3.2 de la FAO a été utilisé pour calculer l'évapotranspiration de référence avec l'équation de la FAO ( Penman-Monteith équation), ETo Calculator, crée les fichiers de l'évapotranspiration (ETo), la température et le CO<sub>2</sub>, qui sont utilisés par AquaCrop pour les modélisations. Les données météorologiques utilisées sont: Les températures journalières maximales et minimales (°C), humidité relative de l'air (%), vitesse du vent (m/s), et la durée de l'insolation (h/jour).

## I.6.6. Evaluation du modèle

La performance du modèle a été évaluée par l'utilisation des paramètres statistiques suivants:

**AAE** (Average Absolute error) erreur absolue moyenne entre données simulées et observées, se calcule par l'équation :

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{N}$$

**RMSE** (root mean square error) la racine de l'erreur quadratique moyenne.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{N}}$$

L'RMSE est l'un des indicateurs statistiques les plus couramment utilisés (*Jacovides et Kontoyiannis., 1995*), elle mesure l'amplitude moyenne de la différence entre les prédictions et les observations. Elle varie de 0 à l'infini, positif,

**d (Willmott's index of agreement):**

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - MO| + |O_i - MO|)^2}$$

L'indice d'agrément (*d*) développé par Willmott cherche à améliorer la sensibilité et l'efficacité des corrélations entre les prédictions (*P*) et les observations (*O*) pour la validation du modèle. L'indice d'agrément varie entre 0 (mauvais) et 1 (parfait) et s'interprète comme le coefficient de détermination,  $R^2$ . Cet indice est représenté par le ratio entre le Mean Square Error (*MSE*) et le Potential Error (*PE*). *PE* est la somme des différences au carré entre les observations et les prédictions et représente la plus grande valeur qui peut être obtenue pour chaque paire modèle-observation. L'indice d'agrément est très sensible aux valeurs extrêmes

et permet ainsi d'évaluer les prédictions en fonction des écarts importants et non uniquement de la moyenne.

Un des inconvénients de l'indice d'agrément est que les valeurs relativement élevées peuvent être obtenues (plus de 0,65), même si le modèle fonctionne mal, et que malgré les intentions de Willmott , (1982), (d)n'est pas encore très sensible aux systémiques sur-ou sous-estimations (Krause et al., 2005).

Ou :

$S_i$  et  $O_i$  sont les valeurs simulées et observées (mesurées), qui sont prises à la fin de la saison ,  $N$  est le nombre d'observation,  $\bar{O}_i$  et  $\bar{S}_i$  sont les moyennes des valeurs d' $O_i$  et  $S_i$ .

**r (Coefficient de corrélation) :**

Le coefficient de corrélation est un indicateur du degré de proximité entre les valeurs observées et les valeurs estimées du modèle. Les valeurs observées et simulées sont mieux corrélées si le coefficient de corrélation se rapproche à 1. Si les valeurs observées et prédites sont soit complètement indépendantes elles ne sont pas corrélées alors sera nul (Mutreja, 1992). Le coefficient de corrélation a été estimé par l'équation suivante:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$$

## II.1. Résultats

### II.1.1. Comportement métrologique

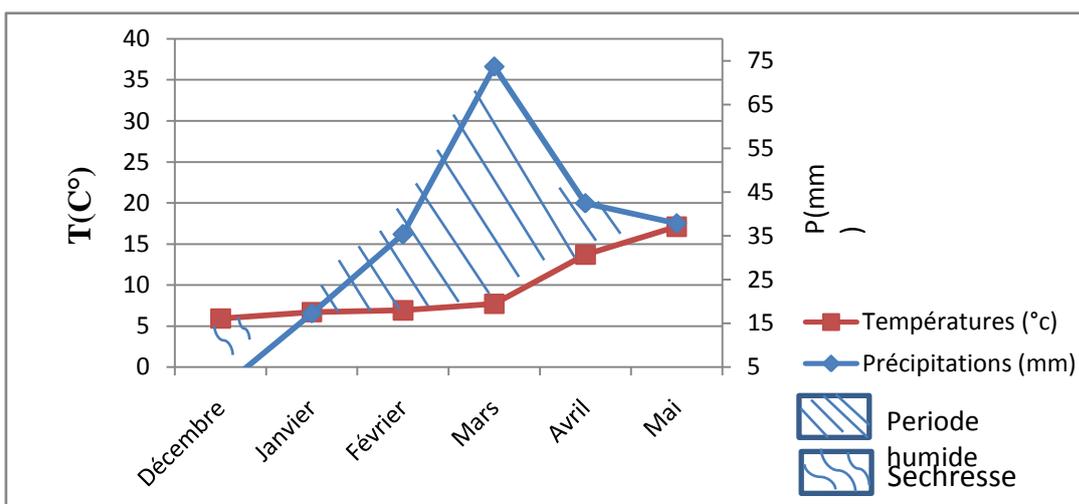
#### II.1.1.1. La température

En analysant les données de la période 2015-2016, il ressort que la température moyenne est 9,66°C pour la région 1 (INRAA), avec un minimum dans le mois de Décembre (5,9°C) et un maximum en Mai (17,1°C), cette augmentation de température coïncide avec la phase de remplissage des grains; pour la région 2 (Chania), la température minimale 9,5°C correspond au mois de Février et la maximale (21,1°C) au mois de Mai, la température moyenne est de 12,94°C.

#### II.1.1.2. La pluviométrie

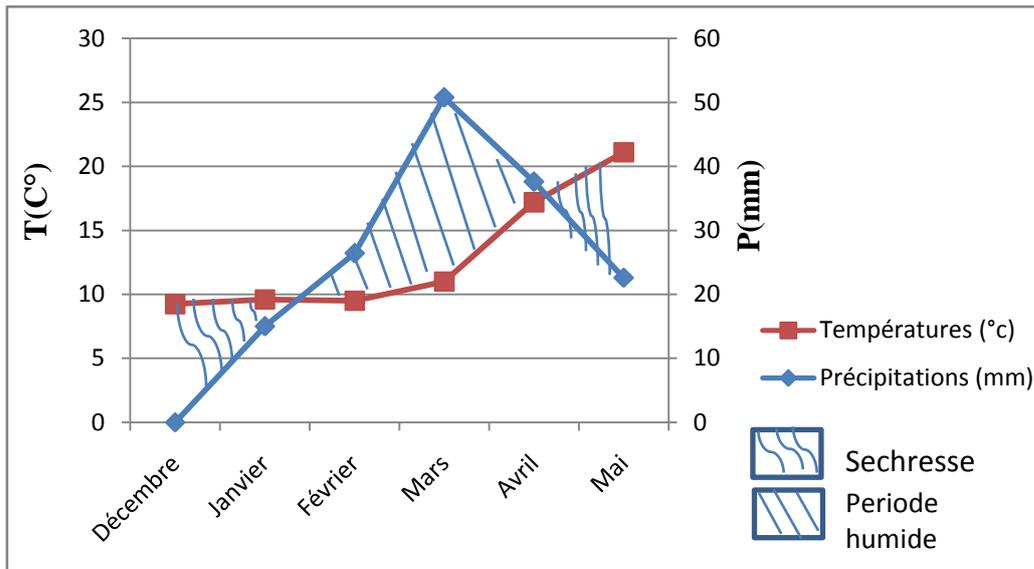
La quantité des précipitations enregistrées dans les deux régions durant le cycle cultural de la saison (2015-2016) est 206,5 mm pour la région 1 (INRAA) répartie d'une manière irrégulière, ou la grande valeur de précipitation coïncidente avec le mois du mars (73,66 mm), et la pluviométrie est rare durant le mois de janvier (17,27mm) ; pour la région 2 (Chenia) le cumul de pluie est 152,38mm dont la faible valeur est 14,98mm en Janvier, la pluviométrie est élevée durant le mois de Mars (50,78mm).

La variation de la température et la pluviométrie durant le cycle cultural est résumée dans les diagrammes ci dessous (figure 09 et 10) en les deux régions.



**Figure 09** : Diagramme représentant les Pluviométries et les températures moyennes enregistrées sur le site INRAA de Sétif (2015-2016).

Sur le site INRAA de Sétif, la campagne agricole 2015/2016 a été caractérisée par deux périodes sèches, la première s'étend avant le mois de Décembre, la seconde période débute de mois Avril et se termine à la fin de cycle cultural. La période humide a coïncidé avec les mois Janvier, février, mars et s'étale jusqu'à d'Avril (figure 09).



**Figure 10** : Diagramme représentant les Pluviométries et les températures moyennes enregistrées sur le site de la région 2 (Chenia) (2015-2016).

Sur le site de la région 2 (Chenia), la campagne agricole 2015/2016 a été aussi caractérisée par deux périodes sèches, la première s'étend de mois Décembre jusqu'à janvier, la seconde période débute du mois d'Avril et se termine à la fin de cycle cultural (figure 10). La période humide s'est coïncidée avec les mois Janvier, Février, Mars et Avril.

Donc en comparant deux les régions d'étude, on constate que la région 1 d'INRAA (Sétif) a reçu plus de pluies et le cumul a été plus élevé de 54,12 mm que le total calculée pour la région 2 (Chenia).

Du point de vu températures moyennes mensuelles, il a fait plus froid sur la région 1 (INRAA) au cours de l'hiver. Au cours de printemps les régions présentent des moyennes mensuelles très proches.

## II.1.2.Simulation du bilan hydrique

### II.1.2.1.Paramètres de mesures :

Pour les deux régions (INRAA et Chania), à l'échelle du cycle cultural entier (tous génotypes confondus), les résultats de la simulation du bilan hydrique par le modèle Aquacrop indiquent un grand écart, entre évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle (Tableau V).

**Tableau V:** Résultats de la simulation du bilan hydrique des quatre variétés pour les deux régions (l'INRA et Chania).

Régions	ETM (mm)	ETR (mm)
Région 1(INRAA)	373,9	91,05
Région 2 (Chania)	137,2	30,76

### II.1.2.2. Phases de stress hydrique selon la phénologie :

Le pourcentage du stress hydrique est calculé par la méthode utilisé par Doorenbos et Kassam (1979).

$$\text{Stress hydrique} = 1 - (\text{ETR}/\text{ETM})$$

Les valeurs du pourcentage de stress hydrique sont entre 0 et 1 ; 0=pas de stress, 1=stress.

Pour déterminer l'effet de stress hydrique sur le comportement de la plante, on a besoins de connaître l'évapotranspiration potentielle, et l'évapotranspiration réelle, donc on calcule le coefficient de stress hydrique (Tableau VI). Puis on détermine le pourcentage de stress des quatre variétés (deux introduite, deux locale) dans les deux régions (l'INRA et Chania).

**Tableau VI:** Pourcentage du stress hydrique selon les stades de la région l'INRA et Chania

Région	INRAA	Chania
--------	-------	--------

	Jour	ETM (mm)	ETR (mm)	SH (%)	Jour	ETM (mm)	ETR (mm)	SH (%)
<b>Oued Zenati</b>								
Semi-Levée	28	54,1	13,96	74	28	53,3	15,5	46
Levée -Epiaison	136	142,4	73,03	48	139	186,2	56	55
Epiaison-maturité	34	177,4	5,22	97	28	156,4	1,05	96
<b>Bousselem</b>								
Semi-Levée	27	52,7	12,95	75	27	52,6	14,05	10
Levée -Epiaison	130	120,5	72,50	40	130	186,9	57,57	47
Epiaison-maturité	41	200,7	5,22	97	38	204,6	3,45	47
<b>Altar 84</b>								
Semi-Levée	29	55,5	14,74	73	29	54,5	26,10	45
Levée -Epiaison	127	113,8	70,69	37	130	185	55	57
Epiaison-maturité	42	204,6	5,25	97	36	198,3	15,30	91
<b>Mexicali 75</b>								
Semi-Levée	27	52,7	12,96	75	27	52,6	63,20	48
Levée -Epiaison	132	130,9	72,58	44	135	208,9	59	56
Epiaison -Maturité	39	190,3	5,14	97	33	180,1	2,95	94
<b>Moyenne</b>								
Semi-Levée	27,75	53,75	13,65	74	27,75	53,25	29,71	37
Levée-Epiaison	131,25	126,9	72,2	42	133,5	191,75	56,89	53
Epiaison-maturité	39	193,25	5,20	97	33,75	166,85	5,69	82

Les résultats montrent que pour chacune des deux régions, les valeurs du stress hydrique entre les variétés sont similaires pour chaque stade.

### Le stade Semis-levée

#### ➤ Région 1(l'INRA) :

Cette phase correspond à l'installation de la culture durant la quelle le taux de la couverture végétal est plus faible, elle dure 27,75 jours où le bilan hydrique est déficitaire.

L'évapotranspiration réelle (ETR) pour ce stade est relativement faible soit:13,65mm, alors que l'évapotranspiration potentielle de la culture (ETM) est de 53,75mm.

Le coefficient de stress  $K_s=0,74$ , ceci signifie que l'évapotranspiration réelle était déficitaire de près de 74% de celle prédite pour cette phase (tableau VI).

➤ **Région 2 (Chania) :**

L'évapotranspiration réelle (ETR) pour ce stade est de 29,71mm alors que l'évapotranspiration potentielle de la culture (ETM) est de 53,25mm. Cette phase dure 27,75jours (Tableau VI).

Le coefficient de stress  $K_s = 0,37$ , ceci signifie que l'évapotranspiration réelle était déficitaire de près de 37% de celle prédite pour cette phase.

● **Le stade levée –épiaison :**

➤ **Région 1 (l'INRAA) :**

Ce stade se caractérise par un développement considérable du système racinaire et une augmentation de taux de la couverture végétale ; la durée de cette phase est de 131, 25jours.

L'évapotranspiration potentielle de la culture est 126,9mm, tandis que le cumul de l'évapotranspiration réelle égale de 72,2mm. Le coefficient de stress est 0,42, ce qui correspond à 42% de stress hydrique (tableau VI).

➤ **Région 2 (Chania) :**

Cette phase dure 133,5jours. On enregistre un cumul d'ETR et d'ETM de 56,89mm et 191,75mm respectivement, le coefficient de stress pour ce stade  $K_s=0.53$ , ce qui correspond à 53% de stress hydrique (tableau VI).

● **Le stade Epiaison– Maturité :**

➤ **Région 1 (INRAA) :**

Ce stade débute de la fin de l'épiaison et s'étale jusqu'à la maturation complète de la graine. On enregistre un cumul de l'évapotranspiration potentielle plus élevé avec 193,25mm,

et un cumul d'évapotranspiration réelle très faible de 5,20mm, ce stade a été caractérisé par un stress hydrique très élevé 97% (tableau VI).

➤ **Région 2 (Chania) :**

Ce dernier stade de développement se caractérise par : une forte ETM et une faible ETR avec respectivement 166,85 mm et 5,69 mm ; ce stade est caractérisé par un stress hydrique très élevé 82% (tableau VI).

Pour le premier site, INRAA Sétif, les résultats montrent que les valeurs du stress hydrique entre les variétés sont presque similaires, et que le stress est intense au dernier stade (Épiaison-maturité),  $K_s=0,97$ , et au premier stade (Semis-levée),  $K_s=0,74$ . Il y a moins de stress au stade (levée-épiation),  $K_s=0,42$ .

Pour le second site (Chania), le stress hydrique est faible au premier stade (Semis-levée),  $K_s=0,37$ , moyen dans le stade (levée – épiation),  $K_s=0,53$  et fort au dernier stade (Épiaison-maturité),  $K_s=0,82$ .

Les résultats indiquent que le stress est plus fort au dernier stade (Épiaison-maturité) pour les deux régions. D'une manière générale, le stress hydrique durant le cycle cultural entier de la culture du blé dur est plus marqué dans la première région d'étude (INRAA Sétif), avec une moyenne de 0,71, par rapport à la deuxième région (Chania) où le stress avoisine 0,57 (tableau VI).

### II.1.3. Simulation et Evaluation des composants du rendement par Aquacrop :

#### II.1.3.1. Le rendement grain:

➤ **Région 1 (INRAA) :**

La variété Boussellem a obtenu la valeur la plus élevée (19,62 qx/ha avec une sur-estimation de 61,08%), le plus faible rendement est obtenu par la variété Oued Zenati (12,64qx/ha avec une sous-estimation de 29,97 %) (Tableau VII).

➤ **Région 2 (Chania):**

La variété Oued Zenati a obtenu la valeur la plus élevée (33,3qx/ha avec une sous-estimation de -31,4%). Le plus faible rendement est obtenu par la variété Altar84 (18,3qx/ha avec une sous-estimation de -22,27%) (Tableau VII).

**Tableau VII :** Comparaison entre valeurs simulées et observées du rendement des deux régions (INRAA et Chania).

Régions	RDT					
	INRAA			Chania		
Génotypes	Observé	Simulé	PE%	Observé	Simulé	PE%
<b>OZ</b>	18,05	12,64	-29,97	27,51	3,33	-31,4
<b>BSS</b>	12,18	19,62	61,08	14,22	2,37	-79,11
<b>ALT 84</b>	18,63	19,54	48,84	15,04	1,81	-22,27
<b>MX 75</b>	9,03	15,50	71,65	11,83	2,63	-21,47
<b>Moyenne</b>	<b>14,47</b>	<b>16,82</b>	<b>37,9</b>	<b>17,15</b>	<b>2,54</b>	<b>-38,56</b>
<b>Min</b>	9,03	12,64	-29,97	11,83	1,81	-79,11
<b>Max</b>	18,63	19,62	71,65	27,51	3,33	-21,47

**II.1.3.2.Labiomasse:**

➤ **Région 1 (INRAA):**

Le modèle a simulé la biomasse en moyenne de 126,32qx/ha. La variété Mixicalia obtenu la valeur la plus élevée (127,51qx/ha) avec une sur-estimation de (6,43%). La variété

Bousselem a obtenu la valeur de biomasse la plus faible (123,32qx/ha) avec une sur-estimation de (9,58%) (Tableau VIII).

➤ **Région 2 (Chania):**

La moyenne de la biomasse simulée par le modèle est de 131,7qx/ha. Les résultats de la simulation montrent que la valeur de la biomasse la plus élevée est de 139,3qx/ha (variété Mexicali 75), avec une sous-estimation de (-96,67%) et la valeur la plus faible est de 12,77qx/ha (variété Altar 84) avec une sous-estimation de (-97,56%) (Tableau VIII).

**Tableau VIII :** Comparaison entre valeurs simulées et observées la biomasse aérienne des deux régions (INRAA et Chania).

	<b>BIOM</b>					
<b>Régions</b>	<b>INRAA</b>			<b>Chania</b>		
<b>Géotypes</b>	<b>Observé</b>	<b>Simulé</b>	<b>PE%</b>	<b>Observé</b>	<b>Simulé</b>	<b>PE%</b>
<b>OZ</b>	133,1	127,07	-4,53	88,33	13,07	-96,23
<b>BSS</b>	118,23	123,32	9,58	78,28	12,92	-96,97
<b>ALT 84</b>	115,26	127,40	10,53	75,04	12,77	-97,56
<b>MX 75</b>	119,8	127,51	6,43	78,98	13,93	-56,67
<b>Moyenne</b>	<b>131,66</b>	<b>126,32</b>	<b>5,50</b>	<b>80,16</b>	<b>13,17</b>	<b>-96,85</b>
<b>Min</b>	115,26	123,32	-4,53	75,04	12,77	-97,56
<b>Max</b>	133,1	127,51	10,53	88,33	13,93	-56,67

**II.1.3.3.L'indice de récolte (IR) :**

➤ **Région1 (INRAA) :**

La variété Oued Zenati a obtenu la valeur la plus faible (9,94 %) avec les sous-estimations (-66,82%), et la variété Bousselem a obtenu l'indice de récolte le plus élevé (15,33%) avec sous-estimations de (-65,55%). La moyenne de la simulation de l'indicederécolte est de13,33 %.(Tableau IX).

➤ **Région 2 (Chania) :**

L'indicederécolte est simulé par le modèle avecune moyenne de (19,27%).La variété Oued Zenati qui a été bien simulée (25,47%) avec une sous-estimation de (-56,38%), et la variété Altar 84 a obtenu l'indice de récolte le plus faible (14,37%) avec sous-estimation (-56,38%) (tableau IX).

**Tableau IX:** Comparaison entre valeurs simulées et observées de l'indice de récolte de pour les deux régions (Chania et INRAA).

Régions	IR					
	INRAA			Chania		
Géotypes	Observé	Simulé	PE%	Observé	Simulé	PE%
<b>OZ</b>	29,96	9,94	-66,82	29,97	25,47	-56,38
<b>BSS</b>	44,4	15,90	-64,18	44,38	18,39	-70,88
<b>ALT 84</b>	44,5	15,33	-65,55	44,47	14,37	-71,28
<b>MX 75</b>	38,3	12,15	-68,27	38,30	18,87	-63,62
<b>Moyenne</b>	<b>39,29</b>	<b>13,33</b>	<b>-63,70</b>	<b>39,28</b>	<b>19,27</b>	<b>-65,54</b>
<b>Min</b>	29,96	9,94	-64,18	29,97	14,37	-56,38
<b>Max</b>	44,5	15,90	-68,27	44,47	25,47	-71,28

**TableauX:** Valeurs des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle.

Régions	Observé	Simulé	AAE	RMSE	D
---------	---------	--------	-----	------	---

<b>INRA</b>	RDT	14,47	16,82	5,05	5,64	0,40
	BIOM	131,60	126,32	7,74	8,20	0,48
	IR	39,29	13,33	25,96	26,20	0,30
<b>Chania</b>	RDT	17,15	2,54	14,61	15,68	0,38
	BIOM	80,16	13,17	66,98	67,16	0,11
	IR	39,28	19,27	20,005	22,24	0,23

## Conclusion

Le stress hydrique affecte le développement et le bon fonctionnement des plantes. Par ailleurs, et pour bien se développer, la plante doit disposer des mécanismes d'adaptation qui lui permettent de supporter la manque d'eau.

Le modèle de culture « AQUACROP » a été utilisé pour simuler le rendement, la biomasse et l'indice de récolte, ainsi il a permis de déterminer des paramètres climatiques tels que l'évapotranspiration et la transpiration de la culture afin d'estimer le coefficient du stress et les phases stressées, A partir des estimations du modèle, on peut dire que le dernier stade (Epiaison –maturité) est le plus sensible au stress hydrique dans les deux régions ( $k_s = 0$ ). Cette estimation a confirmé l'importance de l'action du stress terminal sur les génotypes.

Selon les résultats obtenus on peut dire que la simulation du rendement, de la biomasse et de l'indice de récolte par le modèle « AQUACROP », les valeurs des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle AAE, MRSE et  $d$  montrent que le modèle a été acceptable puisqu'on a noté une corrélation entre les valeurs simulées et observées, le test de Student-Fisher confirme, cela est due à des problèmes de calibration.

Le prolongement de ces travaux de recherche pourrait se faire en tentant :

-D'appliquer cette méthode de simulation par le modèle « AQUACROP » sur d'autre types de sol étalée sur plusieurs années, ce modèle est particulièrement adapté pour améliorer les conditions où l'eau est un facteur limitant de la production agricole.

-De préparer des journées pour les agriculteurs et les informer du moment où on doit faire l'irrigation d'appoint.

-Le modèle est capable de simuler des paramètres hydrauliques, donc il serait souhaitable de les exploités dans des études futures sur l'efficacité d'utilisation de l'eau en collaboration avec hydrauliciens.

## Référence bibliographique

---

**Abbassenne F. 1997.** Etude génétique de la durée des phases de développement et leur influence sur le rendement et ses composantes chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Thèse magister INA Alger*. 81p.

**Affholder F. 2001.** Modélisation des cultures et diagnostic agronomique régional. Mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brisil Central. *Thèse doctorat, INA. Paris-Grignon*. 231-237p.

**Ait kaki S. 2008.** Contribution à l'étude de l'interaction génotype X milieu pour la qualité technologique chez le blé dur. *Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences université Annaba*.

**Amokrane A., Bouzerzour H., Benmahammed A. et Djekoun A. 2002.** Caractérisation des variétés locales, syriennes et européennes de blé dur évaluées en zone semi-aride d'altitude. *Sciences et Technologie, Université Mentouri Constantine*. Numéro spécial D. 33-38p.

**Amrani. 2013.** Maladie : Méthode et échelle de notation des maladies et accidents divers. *Bulletin des grandes cultures. ITGC.02* : 5p.

**Andarzian A., Bannayan M., Steduto P., Mazrah 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. vol. 100*:1-8p.

**Annicchiario P., Bellah F., Chiari T. 2005.** Defining sub regions and estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: a case study. *Crop Sci. vol. 45* : 1741-1749p.

**Aouade G. 2012.** La partition de l'évapotranspiration en évaporation du sol et transpiration de la végétation dans le continuum « Sol-PlanteAtmosphère » pour une culture de blé dans la région du Haouz : Techniques isotopiques et modélisation. *Thèse de Master Université Cadi Ayyad Faculté des Sciences et Techniques Marrakech Maroc*. 106p.

**Aouali S. et Douici-Khalfi A. 2013.** Recueil des principales maladies fongiques des céréales en Algérie : symptômes, développement et moyens de lutte. *ITGC.8-36p*.

**Araya A., Habtu S., Hadgu K.M., Kebede A., Dejene T. 2010.** Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeumvulgare*). *Agric. Water Manage. 97*: 1838–1846p.

**Araya A., Keesstra S.D., Stroosnijder L. 2010.** Simulating yield response to water of Tef (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model *Field.Crop Res. 116* : 1996–2204p.

**Attia F. 2007.** Effet du stress hydrique sur le comportement écophysologique et la maturité phénologique de la vigne (*Vitis vinifera* L.) : *Etude de cinq cépages autochtones de Midi-Pyrénées. Thèse INP, Toulouse (France)*. 194 p.

## Référence bibliographique

---

- Barbottin A. 2004.** Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des génotypes : pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre. *Thèse de doctorat Institut National agronomique Paris-Grignon*. 164 p.
- Barbottin A., Lecomte C, Bouchard C., Jeuffroy M. 2005.** Nitrogen Remobilization during Grain Filling in Wheat. *Crop science*. 45:1141–1150p.
- Belkhodja M. et Bidai Y. 2004.** Réponse de la germination des graines d'*Atriplex halimus* L. sous stress salin. *Revue Sécheresse*, N°4. vol.15 :331-335p.
- Ben Mohamed L., Rouaissi M., Sebei A., Hamza S. et Harrabi M. 2010.** Effet du génotype, de la date de semis, de la fertilisation azotée et potassique et des fongicides sur le développement de *Septoria tritici*. 8p.
- Ben Rejeb K., Abdely C., et Savouré A. 2012.** La proline, un acide aminé multifonctionnel impliqué dans l'adaptation des plantes aux contraintes environnementales. *Biologie Aujourd'hui*. 206 (4) : 291-299p.
- Benaceur M., Rahmoun C., Sdiri H., Medahi M., Selmi M. 2001.** Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production de grains de blé. *Sécheresse*. 12 (3): 167- 174p.
- Bendarradji L., Bouzerzour H., Ykhlef N., Djekoun A. 2010.** Etude de mécanismes de tolérance à la salinité chez deux variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L) soumis à un stress salin. *Science & Technologie C-N° 32* décembre (2010). 23-30p.
- Benhamou N. 2009.** La résistance chez les plantes. Principes de la stratégie défensive et applications agronomiques. Ed. *TEC et DOC. Paris*. 213-218p.
- Benhebireche N. 2011.** Effet du stress salin sur l'accumulation de la chlorophylle chez le blé dur. *Mémoire étude de l'effet du stress salin sur la germination de blé dur (triticum durum)*. p9
- Benmahammed A., Djekoune A., Bouzerzour H. & Hassous K L., 2005.** Genotype X year interaction of barley grain yield and its relationship with plant height, earliness and climatic factors under semi-arid growth conditions. *Dirasat, Agricultural Sciences*.vol. 32: 239 – 247p.
- Benmahammed A., Kribaa M., Bouzerzour H., Djekoun A. 2010.** Assessment of stress tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) advanced breeding lines under semi arid conditions of the eastern high plateaus of Algeria *Euphytica*. 172 (3): 383-394p.
- Benmansours et BEDDIAR S. 2011.** Etude de la variabilité intra spécifique de la tolérance aux stress salin du blé dur (*Triticum durum*) du stade germination. 13-14p.
- Bonjean A. 2001.** Histoire de la culture des céréales et en particulier celle de blé tendre (*Triticum aestivum* L.). *Dossier de l'environnement de l'INRA*. 21: 29-37p.

## Référence bibliographique

---

- Boote K.J., Jones J.W. et Hoogenboom G. 1998.** Simulation of crop growth : CROPGRO Model. Chapter 18. 651-692p. In : R.M. Peart and R.B. Curry (eds.). Agricultural Systems Modeling and Simulation. Marcel Dekker, Inc, New York.
- Bouatrous Y., Ykhlef N., Mohei el din Solliman M. 2009.** Physiological behaviour of durum wheat plants (*Triticum durum* Desf) grown in salt medium. *Egypt. J of Appl Sc.* 24 (2A): 40-47 p.
- Bouchabke O., Tardieu F., Simonneau T. 2006.** Leaf growth and turgor in growing cells of maize (*Zea mays* L.) respond to evaporative demand under moderate irrigation but not in water-saturated soil. *Plant Cell and Environment.* 29: 1138-1148p
- Bouchelaghem S. 2012.** Contribution à l'étude de l'impact d'un engrais couramment utilisé en algérie (NPK) sur la croissance le métabolisme et le développement racinaire d'un modèle végétale blé dur. *Thèse de doctorat université Constantine.*
- Boufenar-Zaghouane F. et Zaghouane O. 2006.** *Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (Blé dur, blé tendre, orge et avoine).* 1 ère édition. Alger: ECRIE. 154 p.
- Bousba R., Ykhlef N., Djekoun A., 2009.** Water use efficiency and flag leaf photosynthetic in response to water deficit of durum wheat (*Triticum durum* Desf). *World Journal of Agricultural Sciences.* 5: 609 -616p.
- Brisson N. 2002.** Le cadre conceptuel des modèles de culture. Note Présentée par Michel-Claude Girard, correspondant de l'académie, section 7. *Unité Climat, sol et environnement. INRA-Avignon*
- Brisson N. et Delecolle R. 1991.** Développement et modèles de simulation de culture. *Agronomie.* 12 :253-263p.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., BURGER P., Bussiere F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillere J.P., Maraun F., Seguin F. B., Sinoquet H., 2003.** An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy.* 18: 309-332p.
- Brisson N., Juin S., Desfonds V., García de Cortázar Aauri I., Lebonvallet S., Ripoche D., Sappe G., Bes B., Bruchou C., Guerif M., Durr C., Launay M. 2005.** Quelles composantes environnementale et génétique pour l'élaboration de la qualité du blé dur en région PACA? Approche couplée expérimentation – modélisation. Bilan d'un programme de recherche 2001-2005. 1-57 p.
- Brisson N., Launay M., Mary B. et Beaudoin N., 2009.** Conceptual basis, formalisations and parametrization of the STICS crop model Editions QUAE (in press).
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffoy M.H., Ruget F., Gate P., Deviennebarret F., Antonioletti R., Durr C., Nicoulaud B., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Celler P., Machet J.M., Meynard J.M. et Delecolle R. 1998.** STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie.* 18: 311-346p.

## Référence bibliographique

---

**Brisson N., Ruget, F., Gate P., Lorgeau J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E. 2002.** STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*. 22: 69-92p.

**Brunner.2013.** Coevolution and Life Cycle Specialization of Plant Cell Wall Degrading Enzymes in a Hemibiotrophic Pathogen. *Mol. Biol. E* vol. 1p.

**Chaves M. M., Maroco J. P., Pereira J. S. 2000.** Understanding plant responses to drought - from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*. 30: 239- 264 p.

**Chenafi H., Aïdaoui A., Bouzerzour H., Saci A. 2006.** Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian Journal of Plant Sciences*. 5:854-860p.

**Clarke J.M., et Mc craig T.N. 1982.** Excised- leaf water relation capability as an indicator for drought resistance of *Triticum* genotypes. *Can. J. Plant Sci.* 62: 571- 578p.

**Clech B. 2000.** végétale. 2ème édition. *Imprimerie Laplante, France* 412p.

**CNCC. 2009.** Bulletin des variétés « céréales ». *Centre national de contrôle et decertification des semences et plantes*. 96p.

**CNIS. 2017.** ONFAA à partir des données Bilan des importations de l'Algérie des principales céréales.

**Cook J., Johnson V.A., Allan R. E. 1991.** Le blé. In : Greef.M.W.(Eds). Méthodes traditionnelles de sélection des plantes: un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne. *Organisation de coopération et de développement économiques, Belgique*. 27-38p.

**De Wit C.T., Brouwer R. et Penning de vries F.W.T. 1970.** The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. Pudoc, Wageningen, The Netherlands. 47-50p.

**Djermoun A. 2009.** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Nature et Technologie*. 45-53p.

**Dubos C. 2001.** Réponse moléculaire de jeunes plants de pin maritime soumis à un stress hydrique en milieu hydroponique. *Thèse de doctorat. Univ. Henri Poincaré, Nancy-I. France*.

**Dugo M. V. G. 2002.** Effet du déficit hydrique sur l'état de nutrition azotée chez les graminées fourragères. Thèse Université de Poitiers (France). 189p.

**El Fakhri M., Mahboub S., Benchekroin M., Nsarellah N. 2010.** Effet du stress hydrique sur les caractéristiques d'enracinement du blé dur (*Triticum durum* Desf.). Revue « Nature et Technologie » .n° 03.6 : 6-12

## Référence bibliographique

---

- El Jaafari S. 1993.** Contribution à l'étude des mécanismes biophysiques et biochimiques de résistance à la sécheresse chez le blé. Thèse de doctorat. Univ. Gembloux. Belgique. 214p.
- Elhani S., Martos V., Rharrabti Y., Royo C., Garcia del Moral L.F. 2007.** Contribution of main stem and tillers to durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*).
- Er-Raki S. 2007.** Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, Expérimentation et Télédétection. *Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad Marrakech*. 112 p.
- Escalona J. M., Tomás M., Martorell S., Medrano H., Ribas-Carbo M., Flexas J. 2012.** Carbon balance in grapevines under different soil water supply: importance of whole plant respiration. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 18: 308-318p.
- FAO. 2009.** Site des données statistiques de la FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations): [www.faostat.fao.org](http://www.faostat.fao.org).
- FAO. 2018.** Site des données statistiques de la FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations): [www.faostat.fao.org](http://www.faostat.fao.org).
- Feillet P. 2000.** Le grain de blé composition et utilisation. 1ère édition. INRA. Paris. 303 p.
- Garcia de Cortazar-Atauri I. 2006.** Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse de doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier. 349p.
- Haddad S. 2001.** Contribution à l'étude de l'influence du nitrate du plomb sur les paramètres physiologiques et biochimiques du blé (*Triticum durum*) : thèse de magistère. Dept de Biologie. Université Annaba. 128 p.
- Hadria R. 2006.** Adaptation Et Spatialisation Du Modele Stics Pour La Gestion D'un Perimetre Cerealier Irrigue En Milieu Semi-Aride. Vol 216: 21-24p.
- Hanks R. J., Klute A., et Bresler E. 1969.** A numeric method for estimating infiltration, redistribution drainage and evaporation of water from soil. *Water Resour. Re.*, 5: 1064-1069p.
- Hansen S., Jensen H.E., Nielsen N.E. et Swenden H. 1990.** DAISY - Soil Plant Atmosphere System Model NP0 Research in the NAEP report. The royal veterinary and agricultural university (ed) Nr A.10: 272 p.
- Hawkes J. G. 2004.** Why Were Plants Domesticated in Some Areas and Not in Others? *International biodeversity* N° 62 :140 – 144p.
- Henry Y. et De Buysse J. 2001.** L'origine des blés. In : De la graine à la plante. *Bibliothèque scientifique*. 4 p.
- Hireche Y. A. 2006.** Reponse de la luzerne (*Medicago sativa* L) au stress hydrique et à la profondeur de semis. Mémoire de Magister, Université Al Hady Lakhdar-Batna (Algérie). 83p.

## Référence bibliographique

---

- Hopkins W. 2003.** Les relations hydriques dans la plante entière. In: Physiologie végétale. Ed. De book & Larcier. Bruxelles. 44-58p.
- Houria C., Halitim N., Mechri A. 2017.** Modélisation du comportement agronomique de quelques variétés de blé dur en milieu semi aride. Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi. 67p.
- Jacovides C.P. et Kontoyiannis H. 1995.** Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models. *Agric. Water Manage.* 27: 365-371p.
- Jean-Pierre A. Philippe D. Bernard I. Gilles L. Bernard S. François T. Alban T. 2006.** Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA. France. 72 p.
- Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijssman A.J. et Ritchie J.T. 2002.** The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy.* 18p.
- Kazi A. G., Rasheed A., Kzai A. M. 2013.** Biotic Stress and Crop Improvement: A Wheat Focus Around Novel Strategies. In Hakeem K.R. (Eds). *Crop Improvement. Springer Science+ Business Media, Pakistan.* 239-267p.
- Khalighi M., Arzani A. et Poursiahbidi M. A. 2008.** Genetic diversity in *Triticum* ssp and *Aegilops* ssp. using AFLP markers. *African Journal of Biotechnology* Vol. 7(05):546-552p.
- Laberche J-C. 2004.** La nutrition de la plante In *Biologie Végétale*. Dunod. 2e (éd). Paris. 154 -163p.
- Laurent H. Sané P. 2007.** Transfert d'eau et d'énergie. In : *Bioclimatologie. Concept et application*. Ed. Quae. Paris. 246p.
- Lery F. 1982.** L'agriculture au Maghreb ou pour une agronomie méditerranéenne. Ed. *Maisonneuve et Larose, Paris.* 338 p.
- M'Hamdia H., Lamri A. 2015.** Evaluation du stress hydrique chez la culture du blé dur (*triticum durum*), validation de modèle AquaCrop sur la céréaliculture de Sétif. Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi. 64p.
- Madhava Rao K.V., Raghavendra A.S., et Janardhan Reddy K. 2006.** Printed in the Netherlands. *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants.* 1-14 p.
- Maury P., Langlade N., Grieu P., Rengel D., Sarrafi A., Debaeke P., Vincourt P. 2011.** Ecophysiologie et génétique de la tolérance à la sécheresse chez le tournesol. *Innovations Agronomiques.* 14: 123-138p
- Mavromatis T., Boote K.J., Jones J.W., Irmak A., Shinde D. et Hoogenboom G. 2001.** Developing Genetic Coefficients for Crop Simulation Models with Data from Crop Performance Trials. *Crop Science.* 41: 40 – 51p.
- McCown R.L., Hammer G.L., Hargreaves J.N.G., Holzworth D.P. et Freebairn, D.M. 1995.** APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural research. *Agric. Syst.* 50: 255–271p.

## Référence bibliographique

---

- McCown R.L., Hammer G.L., Hargeaves J.N.G., Holzworth D.P. et Freebairn, D.M. 1996.** APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agric. Syst.* 50: 255-271p.
- Mckinion J.M., Baker D.N., Whisler F.D. et Lambert J.R. 1988.** Application of the GOSSYM/COMAX system to cotton crop management. ASAE Paper No. 88-7532p.
- Mekhlouf A., Bouzerzour H., Bemahammed A., Hadj Sahraoui A. et Harkati N. 2006.** Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum, Desf.*) au climat semi- aride. *Sécheresse* 17 (4) :507-513p.
- Menacer F. 2007.** Contribution à l'étude de l'effet de la salinité sur un marqueur biochimique, cas de la proline chez *Atriplex halimus L.* et *A triplex conescens (purch) Nntt.* 99p.
- Monteith J.L. 1972.** Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. appl. Ecol.* 9: 747-766p.
- Mouellef A. 2010.** Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*T. durum Desf.*) au stress hydrique. Mémoire magister *Université Mentouri Constantine.* 82 p.
- Moumni L. 2013.** Quantification de la contrainte hydrique chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*) en milieu semi-aride. *Université de Ferhat Abbas –Sétif.* 58 p.
- Munns R., James R. A., Lauchli A. 2006.** Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *J. Exp. Bot.* 27: 1025-1043p.
- Naville M. 2005.** La biodiversité des espèces cultivées : *Analyse dans le cas du blé.* Paris: Université Paris XI, Paris. 20p.
- Nouri L. 2002.** Ajustement osmotique et maintien de l'activité photosynthétique chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*), en conditions de déficit hydrique. Thèse de magister en Biologie Végétale. 4-16p.
- Oukarroum A. 2007.** Vitalité des plantes d'orge (*Hordeum vulgare L.*) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne. Thèse doctorat. Université De Genève.
- Passioura J. 2004.** Increasing crop productivity when water is scarce: From breeding to field management In: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress "New directions for a diverse planet" Brisbane, Australia. 12p.
- Pictav S. J. 1856.** Bulletin de l'Algérie. 1ère édition. *Just Rouvier, libraire éditeur, Paris.* 405p.
- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., et Fereres E. 2009.** AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal.* 101(3): 438-447p.
- Richards R. A., Rebetzke G. J. Condon A. G. et Van Herwaar-Den A. F. 2002.** Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Science.* 42:111–121p.

## Référence bibliographique

---

- Ritchie J.T., Otter S. 1985.** Description and performance of CERES-Wheat : a user-oriented wheat yield model. In ARS Wheat Yield Project.ARS-38. Natl Tech. Info. Serv., Springfield, Missouri. 159-175p.
- Roudart L. 2006.** Terres cultivées et terres cultivables dans le monde. *Paleohistoria* 48 :150 – 156p.
- Sahraoui T. 2011.** Etude de la variabilité morphologique population f2 blé dur (*Triticum durum*Desf.) utilisation d'un indice de sélection. *Mémoire de magister. Université Hadj lakhdar batna. 6-8p.*
- Salamé N. 2012.** Evolution : accompagnement pédagogique. Caryotypes des 3 mêmes espècesde blé. [www.acces.ens-lyon.fr](http://www.acces.ens-lyon.fr).
- Semcheddine N. 2015.** Evaluation de la tolérance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum*Desf.) par l'étude du bilan hydrique et des paramètres phéno-morpho-physiologiques. Thèse de Doctorat enSciences Agronomiques. *Département des Sciences Agronomiques, Faculté SNV, UFA Sétif 1.*
- Shorter R., Lawn R.J. et Hammer G.L. 1991.**Improving genotypic adaptation in crops - Aole for breeders, physiologist and modellers.*Experimental Agriculture.* 27 : 155-175.
- Slama A., Ben Salem M., Ben Naceur M. et Zid E. D. 2005.** Les céréales en Tunisie : production, effet dela sécheresse et mécanismes de résistance. *Sécheresse* (16) 3 : 9-225p.
- Soltner D. 2005.** Les grandes productions végétales. 20ème Edition. *Collection scienceet techniques agricoles.* 472p.
- Sorrells M. E., Diab A. et Nachit M. 2000.** Comparative genetics of drought tolerance.*Options méditerranéennes* série A (Séminaires méditerranéens). 40: 191-201p.
- SPAETH S-C.et SINCLAIR T-R. 1985.** Linear increase in soybean harvest index during seedfilling. *Agronomy Journal.* 77: 207-211p.
- Steduto P., Hsiao, T.C., Raes, D. et Fereres E. 2009.** AquaCrop-The FAO crop modelto simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal.* 101(3): 426-437p.
- Stöckle C.O., Donatelli M. et Nelson R. 2003.** CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* Second special issue "Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Modelling Cropping Systems, Florence, Italy". 18: 289–307p.
- Stöckle C.O., Martin S. et Campbeli G.S. 1994.** CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 46: 335-359.
- Stöckle C.O., Nelson R.L. 1999.** CropSyst User's Manual. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA, USA.

## Référence bibliographique

---

- Teulat B. B., Monneveux P., Wery J., Borries c., Souyriss 1., Charrieri A., This D. 1997.** Relationships between relative water content and growth parameters under water stress in barley: a QTL study. *New Phytol.* 137: 99-107p.
- Traore A. 2010.** Validation et calibration du logiciel AquaCrop pour l'évaluation des activités hydro-agricoles au niveau de la parcelle. Mémoire master en ingénierie de l'eau et de l'environnement. 39p.
- Triboï E. 1990.** Modèle d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre. *Agronomie*.10: 191- 200p.
- Turki N., Shehzad T., Harrabi M., Okuno K. 2014.** Detection of QTLs associated with salinity tolerance in durum wheat based on association analysis. *Euphytica*.1-13p.
- Turner NC. 1986.** Adaptation to water deficit: a changing perspective. *Aust J Plant Physiol.* 13: 175- 90 p.
- Uehara G., Tsuji G.Y. 1993.** The IBSNAT project. In: Penning de Vries, F.W.T., Teng, P., Metselaar, K. (Eds.), *Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*. Kluwer Academic Publisher, *Dordrecht the Netherlan*.505–513p.
- UNIGRAINS, mars 2019.** 23 avenue de Neuilly, 75116 PARIS. [www.unigrains.fr](http://www.unigrains.fr).
- Van Ittersum M.K., Leffelaar P.A., Van Keulen H., Kropff M.J., Bastiaans L. et Goudriaan J. 2002.** On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy.* 18: 201-234p.
- Verville J.L. 2003.** Le blé, le seigle et le triticales. 18p.
- Wangxi Xia Vinocur P., Altmn A. 200.** "Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance" *plant*.1-14p.
- Weir AH., Bragg PL., Porter JR., Rayner JH. 1984.** A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations *Journal of the Agriculture Science, Cambridge.* 102: 371-382p.
- Whisler J.R., Acock B., Baker D.N., Fye R.E., Hodges H.F., Lambert J.R., Lemmon H.E., Mckinion J.M., Reddy V.R. 1986.** Crop simulation models in agronomic systems – *Advances in Agronomy.* 40: 141-208p.
- Williams JR, Jones CA, Dyke PT. 1984.** A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE.* 27: 129-144p.
- Willmott C.J. 1982.** Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 63:1309–1313p.
- Ykhlef N. 2001.** Photosynthèse, activité photochimique et tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*). Thèse de doctorat d'Etat, Université Mentouri Constantine. 146p.
- Zerrad W., Hillali S., Mataoui B., El Antri S. & Hmyene A. 2006.** Etude comparative des mécanismes biochimiques et moléculaires de résistance au stress hydrique de deux variétés de blé dur. *Biochimie, Substances naturelles et environnement. Congrès international de biochimie. Agadir.*

## Résumé :

### Validation du modèle « AQUACROP » sur la culture du blé dur (*triticum durum*) dans deux régions en milieu semi-aride

Une étude comparative a été réalisée au cours de la saison 2015/2016, sur deux sites expérimentaux, le premier à la station INRAA de Sétif et le second dans la région de Chania à Bordj Bou Arreridj. Le but de ce travail consiste on validation de modèle « AQUACROP » sur les quatre variétés du blé dur sous un climat semi aride. Les résultats montrent que le modèle peut être utilisé pour estimer l'évapotranspiration qui permet de quantifier le stress hydrique durant le cycle de développement du blé avec une bonne précision. A partir des estimations du modèle, on peut dire que le dernier stade (Epiaison –maturité) est le plus sensible au stress hydrique dans les deux régions, INRAA ( $k_s = 0,96$ ) et Chania ( $k_s = 0,82$ ), le modèle peut aussi estimer le rendement grain, la biomasse aérienne et l'indice de récolte. Les indicateurs statistiques que sont AAE, RMSE et d montrent que le modèle a été acceptable.

**Mots clé :** blé dur, semi-aride, stress hydrique, estimation, AquaCrop, validation.

## المخلص:

### التحقق من صحة نموذج « AQUACROP » على زراعة القمح الصلب في منطقتين شبه القاحلتين.

أنجزت الدراسة خلال الموسم 2016/2015 على مستوى محطة الأبحاث INRAA (سطيف) و منطقة الشانية ( برج بوعريريج). الهدف من هذا العمل هو التحقق من صحة نموذج « AQUACROP » لأربعة أنواع من القمح الصلب في مناخ شبه قاحلة.

تظهر النتائج أن النموذج يمكن استخدامه لتقدير التبخر الذي يجعل من الممكن قياس الإجهاد المائي خلال دورة حياة تطور القمح بدقة جيدة. من تقديرات النموذج، يمكننا القول أن المرحلة الأخيرة (Epiaison –maturité) هي الأكثر حساسية للإجهاد المائي في المنطقتين، الشانية ( $k_s = 0,82$ ) و INRA ( $k_s = 0,96$ ). يمكن للنموذج أيضا تقدير محصول الحبوب من الكتلة الحية و فهرس الحصاد. تبين المؤشرات الإحصائية التي تعد AAE, RMSE, d أن النموذج مقبول.

**الكلمات المفتاحية:** القمح الصلب، الشبه الجاف، الإجهاد المائي، النموذج Aquacrop، التقدير، التحقق.

## Summary:

### Validation of the «AQUACROP » model on durum wheat in two semi-aride régions

A comparative study was carried out during the 2015/2016 season on two experimental sites, the first one at the INRAA station in Sétif and the second one in Chania region in Bordj Bou Arreridj. The aim of this work is firstly to validate the Aquacrop model on wheat growing in a semi-arid climate.

The results show that the model can be used to estimate the evapo-transpiration which make it possible to quantify the hydric stress during the cycle of development of the wheat with a good precision. From the model estimates, we can say that the last stage (Epiaison -maturity) is the most sensitive to water stress in the two regions INRAA ( $k_s = 0,96$ ) et Chania ( $k_s = 0,82$ ), The model can also estimate grain yield, aerial biomass and crop index. Statistical indicators such as AAE RMSE and the d showed that the model was acceptable.

**Key words:** durum wheat, semi-aride, water stress, AquaCrop, estimate, validation.

