

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université BLIDA 1

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biotechnologie et Agro-Ecologie



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Option : Eau et Environnement

Thème

Evaluation de l'empreinte hydrique de l'orge

Présenté par : Arnaldo Sanca Arsénio

Devant le jury

- L. Zella	Professeur U. Blida 1	Président de jury
- M. Amirouche	MCB U. Blida 1	Promoteur
- N. Degui	MAA U. Blida 1	Examinatrice
- N. Mimouni	MAA U. Blida 1	Examineur

2021/2022

Dédicace

Je dédie ce travail

A la mémoire de ma mère, que son âme repose en paix.

A ma belle-mère, pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices.

A mon père, pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'accordé.

A mes sœurs qui sont toujours à mes côtés pour me soutenir.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous mes amis de promotion deuxième année Master en eau et environnement.

A tous ceux que j'aime.

ARSÉNIO ARNALDO SANCA

REMERCIEMENT

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr. **M. Amirouche**, je le remercie par la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.*

*Mon remerciement s'adresse à Professeur **L. Zella** président de jury, pour toute la sagesse qu'il m'a donné durant mon parcours universitaire.*

*Je remercie également les membres du jury : **Mr Mimouni N.** et **Mme Degui N.** pour la relecture de mon travail et pour les enseignements apportés durant mon parcours universitaire*

Enfin je remercie tout le monde qui a contribué pour ma formation.

MERCI.

Résumé

L'empreinte hydrique est un concept théorique, qui permet d'estimer la quantité d'eau nécessaire pour produire chacun des biens et services que nous utilisons. En agriculture, l'empreinte hydrique d'un cultivar donné est estimée par le volume d'eau de l'évapotranspiration potentielle des cultures par unité de rendement final de la culture. De nombreuses études ont été menées pour déterminer l'empreinte hydrique de diverses cultures dans différents pays, en utilisant divers modèles et ensembles de données allant du niveau national au niveau régional. Dans cette étude, nous avons utilisé le modèle le modèle agronomique de la FAO, CropWat pour estimer l'empreinte hydrique de la culture de l'orge dans la région de Tiaret pour une période de 30 ans (1992-2021). Et ce, nécessite un calcul préalable de l'évapotranspiration de référence (ET₀), Les besoins en eau d'irrigation (BEI) et les besoins en eau de la culture de l'orge (ET_c). Les résultats obtenus ont montré que l'ET₀ est variée de 828,5 mm/an à 1103,95 mm/an. Par contre les besoins en eau d'irrigation et les besoins en eau de la culture de l'orge sont, respectivement, de l'ordre de 205,12 mm et 376,8 mm. Les résultats trouvés ont montré également que pour produire 1 kg de l'orge, il faut un volume d'eau de 426,18 litres d'eau. Les modèles de simulation de la croissance des cultures sont devenus des outils importants pour évaluer et développer des stratégies d'irrigation déficitaire, en particulier dans les régions arides et semi-arides.

Mots clés : Tiaret, Orge, CropWat, empreinte hydrique, irrigation

Abstract

The water footprint is a theoretical concept, which estimates the amount of water needed to produce each of the goods and services we use. In agriculture, the water footprint of a given crop is estimated by the volume of water from potential crop evapotranspiration per unit of final crop yield. Many studies have been conducted to determine the water footprint of various crops in different countries, using various models and datasets ranging from national to regional levels. In this study, we used the FAO agronomic model, CropWat, to estimate the water footprint of the barley crop in the Tiaret region for a 30-year period (1992-2021). This requires a preliminary calculation of the reference evapotranspiration (ET₀), the irrigation water requirement (IWR) and the water requirement of the barley crop (ET_c). The results obtained showed that ET₀ varied from 828.5 mm/year to 1103.95 mm/year. On the other hand, the irrigation water requirement and the water requirement of the barley crop are, respectively, in the order of 205.12 mm and 376.8 mm. The results found also showed that to produce 1 kg of barley, a water volume of 426.18 litres of water is required. Crop growth simulation models have become important tools for evaluating and developing deficit irrigation strategies, especially in arid and semi-arid regions.

Keywords: Tiaret, barley, CropWat, water footprint, irrigation

ملخص

البصمة المائية هي مفهوم نظري ، مما يجعل من الممكن تقدير كمية المياه اللازمة لإنتاج كل من السلع والخدمات التي نستخدمها. في الزراعة، يتم تقدير البصمة المائية لـصنف معين من خلال قسمة حجم المياه من التبخر المحتمل للمحصول على المردود النهائي. تم إجراء العديد من الدراسات لتحديد البصمة المائية لمختلف المحاصيل في بلدان مختلفة، باستخدام نماذج ومجموعات بيانات مختلفة تتراوح من المستوى الوطني إلى المستوى الإقليمي. في هذه الدراسة، استخدمنا النموذج الزراعي لمنظمة الأغذية والزراعة، CropWat لتقدير البصمة المائية لزراعة الشعير في منطقة تيارت لمدة 30 عامًا (1992-2021). وهذا يتطلب حسابًا مسبقًا للتبخر المرجعي (ET0) واحتياجات مياه الري (BEI) والاحتياجات المائية لمحصول الشعير (ETc). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن ET0 يختلف من 828.5 ملم / سنة إلى 1103.95 ملم / سنة. من ناحية أخرى، تبلغ احتياجات مياه الري والاحتياجات المائية لمحصول الشعير ، على التوالي ، 205.12 ملم و 376.8 ملم. كما أظهرت النتائج أيضًا أنه لإنتاج 1 كجم من الشعير يتطلب حجم ماء يبلغ 426.18 لترًا من الماء. أصبحت نماذج محاكاة نمو المحاصيل أدوات مهمة لتقييم وتطوير استراتيجيات الري الناقص، خاصة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة.

الكلمات المفتاحية : تيارت ، شعير ، محصول ، البصمة المائية ، ري.

TABLE DES MATIERES

Résumé	
Dédicace	
Remerciement	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1. La culture de l'orge	3
1. Origine et historique.....	3
2. Taxonomie	4
3. Description générale de la plante.....	5
3.1. L'appareil végétatif	5
3.1.1. Le système racinaire	5
3.2.2. Le système aérien	5
a. La tige.....	5
b. Les feuilles	5
3.2.2. Le grain	6
4. Le cycle de développement	6
4.1. La période végétative	6
5. Les exigences édapho-climatiques	7
5.1. Exigences thermiques	7
5.2. Exigences hydriques	7
5.3. Exigences édaphiques	7
5.4. Préparation du sol	8
5.5. Le semis	8
6. La récolte	8

7. Importance économique de la culture de l'orge	9
7.1. La production mondiale	9
Production national	10
Chapitre 2. L'eau virtuelle	14
1. Concept de l'eau virtuelle	14
2. L'eau virtuelle sans les relations internationales	16
3. Quelques ordres de grandeur	17
4. Empreinte eau	18
Chapitre 3. Modèle CropWat	19
1. Définition d'un modèle	19
2. Typologie des modèles	20
2.1. Les modèles mécanistes	20
2.2. Les modèles empiriques	20
3. Étapes d'élaboration du modèle	20
3. Modèle CropWat	21
4.1. Les données d'entrées requis par le logiciel	21
4.2. Les sorties du modèle	22
Matériels et méthodes	23
1 situation géographique de Tiaret.....	
2. Choix de la zone d'étude	23
3. Climatologie	24
4. Relief et géomorphologie	24
5. Pédologie	24
6. Ressources en eau	25
Evaluation des besoins en eau de la culture de l'orge par CropWat	26
1. Les données climatiques	26
2. Les données liées à la culture	26
La texture	27
La profondeur d'enracinement de la culture	27

4. Calcul de l'évapotranspiration potentielle	28
5. Calcul de la pluie efficace	28
6. Calcul des besoins en eau des cultures.....	28

Résultats et discussions

1. Analyse des paramètres climatiques	29
1.1. La pluie.....	29
1.2. La température	29
1.3. Humidité relative	30
1.4. Insolation	30
2. Calcul de l'évapotranspiration de référence	31
2.1. A l'échelle annuelle	31
2.2. A l'échelle saisonnière	31
3. Calcul de la pluie efficace	32
3.1. A l'échelle de l'annuelle	32
3.2. A l'échelle de saisonnière	33
4. Calcul des besoins en eau de la culture de l'orge	33
5. Calcul des besoins en eau d'irrigation	34
6. Eau bleue et l'eau verte	34
7. Productivité de l'eau de l'orge	35
Conclusion générale	36
Références bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

Figure1. Croissante fertile	3
Figure 2. Epillet d'orge à deux rangs et à six rangs	4
Figure 3. Cycle de développement de l'orge	6
Figure 4. Production mondial et superficie récolté de l'orge (1961/2020)	9
Figure 5. Production de l'orge de principaux pays producteur (2019/2020).....	10
Figure 6. Production et superficies récoltés de la période (1961/2020).....	11
Figure 7. Rendement de la culture de l'orge de la période (1961/2020).....	12
Figure 8. Production de l'orge dans les pays Maghrébins des 60 dernières années	13
Figure 9. Localisation de la Tiaret.....	23
Figure 10. Les régions naturelles de la wilaya de Tiaret.....	24
Figure 11. Les données climatiques entrées dans le CropWat.....	26
Figure 12. Donnés sur les caractéristiques du sol.....	27
Figure 13. Variabilité interannuelle de la pluie (1992/2021).....	29
Figure 14. Températures moyennes mensuelles (1992/2021).....	29
Figure 15. Humidité relatives, moyennes mensuelles (1992/2021).....	30
Figure 16. Insolation moyenne mensuelle de la région de Tiaret (1992/2021.....	30
Figure 17. Évapotranspiration de référence à l'échelle annuelle (1992/2021).....	31
Figure 18. Évapotranspiration de référence à l'échelle saisonnière.....	31
Figure 19. Variation interannuelle de la pluie efficace totale (1992/2021).....	32
Figure 20. Pluie efficace à l'échelle de la saison.....	33
Figure 21. Variation interannuelle du besoin en eau de l'orge (ETc).....	33
Figure 22. Variation interannuelle du besoin en eau d'irrigation	34
Figure 23. Variation interannuelle de la quantité d'eau bleue et verte	35
Figure 24. Variation interannuelle de la productivité de l'eau de l'orge.....	35

Liste des tableaux

Tableau 1. Le volume d'eau utilisé pour produire 1 kg de bien.....	18
Tableau 2. Les données d'entrées du modèle Cropwat	21
Tableau 3. Les données de sorties du modèle Cropwat.....	22

Liste des abréviations

ET0 : Evapotranspiration de référence

ETP : Evapotranspiration potentielle

ETc : Besoin en eau des cultures

ETM : Besoin en eau de culture

EUE : Efficience d'utilisation de l'eau

Kc: Coefficient cultural

FAO: Food and Agriculture Organization

INTRODUCTION GENERALE

Depuis toujours, la disponibilité de l'eau a guidé l'apparition et le développement d'organismes vivants sur la planète. Le souci d'accroître la production agricole afin de nourrir une population de plus en plus croissante a engendré un usage fréquent de l'irrigation. Inévitable dans les régions arides, elle est de plus en plus là où les précipitations sont insuffisantes ou mal réparties. Partout où elle a été pratiquée, l'irrigation a assuré une valeur ajoutée et a montré son opportunité à la sécurité alimentaire dans plusieurs pays et à cet égard elle fortement subventionnée. Mais l'irrigation est fondamentalement aquavore, elle consomme énormément d'eau, environ les deux tiers de tous les eaux prélevées dans le monde. Ceci est dû au fait que la quasi-totalité (98%) de l'eau absorbée par la plante est perdue inévitablement par transpiration, ajouté à cela les pertes par évaporation, par ruissellement et par ressuyage liées aux méthodes d'irrigation. (Zella, 2019). L'objectif d'irrigation est de compenser le déficit pluviométrique par rapport aux besoins en eau des cultures au niveau de la parcelle.

En Algérie, la consommation en eau dans le secteur agricole est d'environ 7 milliards de m³ en moyenne annuelle, sachant que la consommation globale nationale (consommation de la population en eau potable, les besoins des secteurs industriel et agricole) est de 10,6 milliards de m³/an (MRE, 2018). Par conséquent la situation climatique actuelle surtout manque d'eau n'a pas permis au pays de couvrir ses besoins alimentaires. Actuellement l'Algérie importe annuellement pour le plus de 4 milliards de dollars de produits alimentaires, ce qui représente 25% d'importations (Zella, 2017). D'où la nécessité d'une modélisation agricole efficace qu'aide aux agriculteurs lors de déclenchement d'irrigation réduisant ainsi les pertes et augmentant l'efficacité d'utilisation de l'eau en irrigation.

L'objectif de cette étude est de déterminer les besoins en eau de la culture de l'orge dans une région semi-aride, en utilisant le modèle CropWat.

Ce document est structuré en trois parties :

La première partie abordera dans un premier temps les caractéristiques de la culture en question (son origine, sa classification botanique, leurs places à l'échelle mondiale et nationale). Dans un second chapitre le pilotage d'irrigation et enfin le dernier chapitre abordera le modèle de culture (CropWat) qui a été choisi comme un outil d'aide à la modélisation.

Introduction

La deuxième partie traitera la présentation du site d'étude (localisation, caractéristiques climatiques et pédologiques), et les différents jeux de données utilisés pour l'élaboration de la présente étude.

Enfin, la troisième partie du document sera consacrée aux travaux de modélisation. Elle traite les résultats de simulations obtenus par le modèle Cropwat et leurs discussions.

Le document se termine par une conclusion générale résumant les résultats et les possibilités de valorisation de ces résultats.

**SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE**

Chapitre 1. La culture de l'orge

1. Origine et historique

Considérant les découvertes archéologiques dans les premiers villages du Croissant Fertile (figure 1), l'orge (*Hordeum vulgare* L.) est la première céréale à être domestiquée dans cette région. Le territoire comprend, la Vallée du Jourdain et les zones adjacentes de Palestine, de la Jordanie et de l'Irak, jusqu'au l'Ouest de l'Iran (**Feldman, 1976**).

L'orge est une des premières céréales cultivées par les hommes 8000 ans avant J-C. L'orge servait à fabriquer des galettes et autres bouillies. En Egypte, la légende raconte que suite à l'inondation d'une récolte d'orge, les graines germées ont fermenté pour donner naissance à la découverte de la bière (**Zairi, 2015**).

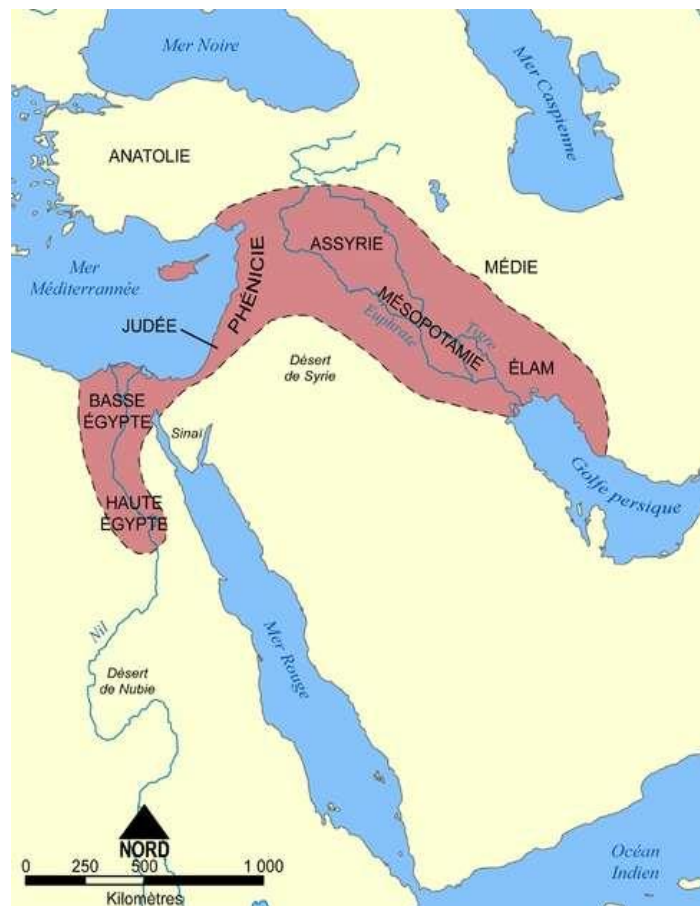


Figure 1. Le Croissant Fertile

(commons.wikimédia.org)

2. Taxonomie

L'orge appartient au règne végétal, à l'embranchement des Anthophytes, à la classe des Monocotylédones, à la sous classe des Commelinidae, à l'ordre des Cyperales, à la famille des Poacées (ex graminées), sous-famille des Hordeoideae, la tribu des Triticées (ex Hordées) et au genre (**Hordeum Chadeaud et Emberger, 1960; Hariri, 2003**).

Liné (1755) cité par Grillo (1959), classe les orges selon le degré de fertilité des épillets et la compacité de l'épi en deux groupes :

□ **Le groupe des orges à six rangs** dont les épillets médians et latéraux sont fertiles et qui se subdivise selon le degré de compacité de l'épi en :

- *Hordeum hexastichum* L. (escourgeon) a un épi compact composé sur chaque axe du rachis de 3 épillets fertiles.

- *Hordeum tétrastichum* L., a un épi lâche composé sur chaque axe du rachis de 2 épillets fertiles.

□ **Le groupe des orges à 2 rangs** dont les épillets médians seuls sont fertiles. Ce sont :

- *Hordeum distichum* L. a un épi aplati et lâche composé de deux rangées d'épillets fertiles, sur chaque axe du rachis, entouré de 4 épillets stériles. Les figure 2 représente les orges à six rangs et ceux à deux rangs (**Soltner, 2005 ; Souillah, 2008**) de 3 épillets fertiles.

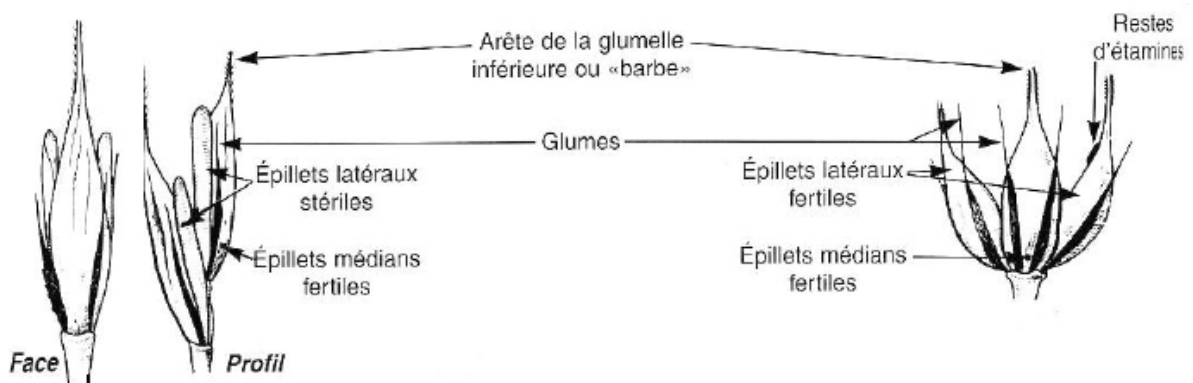


Figure 2. Epillet d'orge à deux rangs à gauche et d'orge à six rangs à droite (**Soltner, 2005**)

3. Description générale de la plante

Les caractères morphologiques et anatomiques sont à la base de la distinction des différentes espèces du genre *Hordeum* et peuvent être associés à la productivité agricole de nombreuses façons. Avec ses caractères morphologiques et physiologiques, l'orge se distingue très bien des autres espèces de céréales (**Boufenar-Zaghouane, 2006**). Par exemple, la longueur de la paille et de la résistance à la verse, les composantes du rendement, la réponse à diverses maladies, la photosynthèse, le temps et la quantité des besoins en eau, les engrais et les pesticides appliqués et les effets des stress environnementaux tels que la sécheresse, les carences du sol et la toxicité sont tous liés en partie à l'anatomie végétale et la morphologie de la plante (**Soltner, 2005**).

3.1. L'appareil végétatif

3.1.1. Le système racinaire

Le système racinaire de l'orge est du type fasciculé, composé de deux systèmes qui se forment au cours du développement de la plante : un système primaire ou séminal s'étalant de la germination à la ramification de la plantule « tallage » un système secondaire ou système de racines coronaires apparaît au moment où la plante se ramifie « tallage »

3.1.2. Le système aérien

Les graminées sont des plantes herbacées de petite taille, la plante se développe en produisant un certain nombre d'unités : les talles

a. La tige

Sur la partie aérienne des céréales, on distingue une tige principale « le maître brin » et des tiges secondaires « les talles » qui naissent à la base de la plante (**Gonde et Jussiaux, 1980**).

Quant aux entre-nœuds, ils sont creux chez les blés tendres, l'orge et l'avoine, et pleines chez les blés durs (**Belaid, 1996**). L'orge est caractérisée par un fort tallage supérieur à celui du blé et un chaume plus faible susceptible à la verse par rapport que celui du blé (**Camille, 1980**).

b. Les feuilles

Les feuilles sont à nervures parallèles et formées de deux parties : la partie inférieure entourant la jeune pousse ou la tige : c'est la gaine, la partie supérieure en forme de lame : c'est le limbe qui possède à sa base deux prolongements arqués glabre, embrassant plus ou

moins complètement la tige ; ce sont les oreillettes ou stipules. A la soudure du limbe et de la gaine se trouve une membrane non vasculaire entourant, en partie, le chaume : c'est la ligule qui est bien développée (Belaid, 1996 et Camille, 1980).

3.2.2. Le grain

Le fruit des graminées est un fruit sec indéhiscent appelé un caryopse ou grain. Chez l'orge le grain est vêtu ; le péricarpe du grain se soude aux glumelles (Belaid, 1996). Il est prolongé par une barbe.

4. Cycle de développement

Le cycle de développement de l'orge comprend trois périodes bien distinctes : la période végétative, la période reproductrice et la période de maturation du grain.

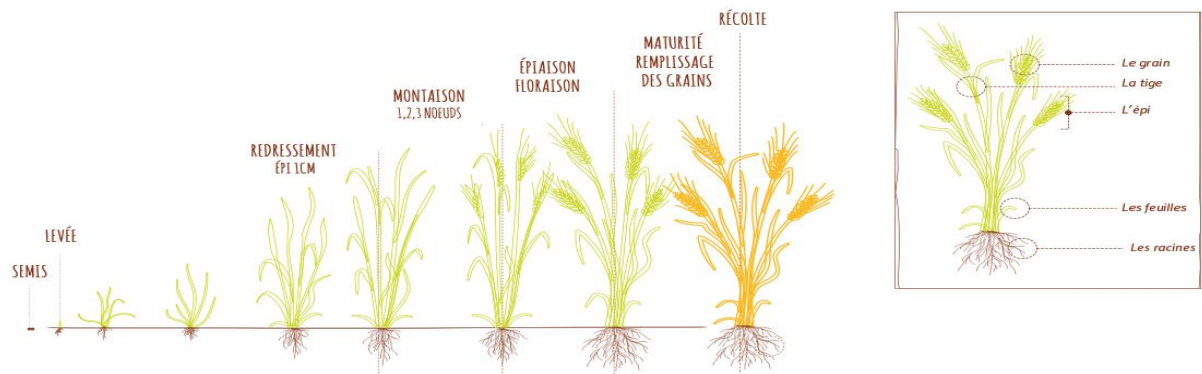


Figure 03. Cycle développement de l'orge (wikipédia)

4.1. La période végétative

Elle débute par le passage du grain de l'état de vie ralentie à l'état de vie active au cours de la germination, et qui se traduit par l'émergence de la radicule et des racines séminales et celle du coléoptile. Dès que la première feuille a percé le coléoptile, ce dernier s'arrête de croître et se dessèche. La première feuille fonctionnelle s'allonge, puis la deuxième, jusqu'à la quatrième toutes en position alterne, en suite apparaît la première tige l'aisselle de la première feuille de la tige principale.

Ainsi, le stade de début tallage est atteint pendant cette phase, des talles apparaissent d'une façon synchrone. Le tallage se caractérise par l'entrée en croissance de bourgeons

différenciés à l'aisselle des feuilles. La zone de sortie des talles est appelée plateau de tallage. L'aptitude à émettre une ou plusieurs talles est une caractéristique variétale mais fortement dépendante des conditions du milieu : température, eau azote, et des techniques culturales. La fin de ces phases observées lorsque la jeune inflorescence (apex) est d'environ 1 cm au-dessus du plateau de tallage. On atteint donc le stade début montaison qui se caractérise par la différenciation et l'élongation des ébauches des nœuds et des entrenœuds.

5. Les exigences édapho-climatiques

5.1. Exigences thermiques

Selon **Moule (1980)**, les sommes de températures exigées pour l'ensemble du cycle de la plante pour atteindre le niveau de rendement sont de 1600 à 1700 degré jours pour l'orge de printemps. En zone tempérée, l'orge d'hiver a un cycle germination maturité de 1900 à 2000 degrés jour (**Moule, 1980**).

D'après **Simon et al. (1989)**, l'orge est plus sensible au froid que le blé, le zéro de végétation est voisin de 0°C. Suivant la sensibilité variétale, le seuil thermique des dégâts foliaires après le gel hivernal est voisin de -8°C et le seuil thermique de mortalité varie entre 12°C et -16°C.

5.2. Exigences hydriques

L'orge nécessite en moyenne 450 à 500 mm d'eau pour produire 40 quintaux de grain et 3,5 tonnes de paille (**Moule, 1980**). Ces besoins sont généralement satisfaits quand il s'agit d'une orge d'hiver. Dans le cas de l'orge de printemps, la pluviométrie printanière ne peut les satisfaire, ce qui explique l'importance des réserves en eau du sol pour cette culture. D'autre part on doit signaler que les besoins en eau de l'orge sont surtout élevés dans le début de son développement (**Parts et Clément, 1971**).

5.3. Exigences édaphiques

L'orge s'accommode mal dans les sols lourds, argileux. Elle tire mieux parti des terres légères peu profondes et calcaires (**Soltner, 1988**).

D'après **Parts et Clément (1971)**, l'orge donne les meilleurs résultats dans les meilleures terres, mais elle tire profit, en bonne partie, des terres minces et caillouteuses pourvu qu'elle dispose d'eau en assez grande quantité au début de son développement.

5.4. Préparation du sol

L'orge nécessite un sol bien préparé et ameubli sur une profondeur de 20 à 25 cm, et présentant une structure fine en surface. La séquence de travail du sol à recommander dépend de la nature de la culture précédente (**Andich et Alaoui, 2003**). Toutefois, les opérations de préparation de sol retenues sont : un labour moyen d'environ 20 cm, un deuxième recroisement au cover-crop, un troisième recroisement et éventuellement un quatrième, selon l'état du lit de semis, puis suivi d'un roulage (**FAO, 2005**).

5.5. Le semis

Une dose optimale de semis est nécessaire pour avoir un bon peuplement – épi conditionnant, ainsi, un bon rendement. D'après **Soltner (1988)**, l'orge est une céréale qui talle bien, une densité de 450 à 600 épis/m² est nécessaire pour un objectif de rendement en grains de 50 à 60 q/ha. Selon **Toutain (1977)**, l'orge nécessite l'utilisation de semences sélectionnées et traitées, dont la faculté germinative se situe entre 95 et 98%. Le semis est pratiqué à la volée, ou en ligne à raison de 120 à 140 kg et à une profondeur de 4 cm.

La période de semis se situe entre la fin du mois d'octobre et la fin du mois de novembre. L'orge est très sensible au froid durant le stade 1-2 feuilles mais néanmoins plus résistante durant le stade 3-4 feuilles. Partant de là, la culture doit donc atteindre ce stade avant les grands froids de janvier ; d'où l'intérêt d'un semis précoce dans la pratique céréalière (**Malki et al, 2002**).

Les semis précoces donnent significativement plus de talles fertiles que les semis tardifs. D'après **Bouzerzour et al, (1986)**, les semis précoces tallent mieux et donc produisent beaucoup plus de matière sèche relativement aux semis tardifs.

6. La récolte

La récolte des grains est réalisée à maturité. Le grain est mûr lorsqu'il cesse d'être rayable à l'ongle et devient cassant sous la dent, son taux d'humidité est de 14 à 16% (**Soltner, 1980**). Un taux d'humidité excédant les 20% rend la récolte mécanique très difficile, et un taux d'humidité réduit en dessous de 12% est aussi préjudiciable suites aux pertes par les cassures des grains (**Nait-Dahamane, 1987**).

7. Importance économique de la culture de l'orge

7.1. Production mondiale

L'orge (*H. vulgare* L.) figure parmi les sept céréales les plus cultivées au monde. Elle occupe la quatrième position de par sa production après le maïs, le blé tendre et le riz et avant le sorgho, l'avoine et le seigle (FAO, 2021). La production mondiale de l'orge avoisine les 142 millions de tonnes pour une superficie emblavée de près de 64 millions d'hectares (figure 3). Selon la FAO, la production mondiale de l'orge n'a pas connue de grandes variations durant la période 2009-2020 (FAO, 2021).

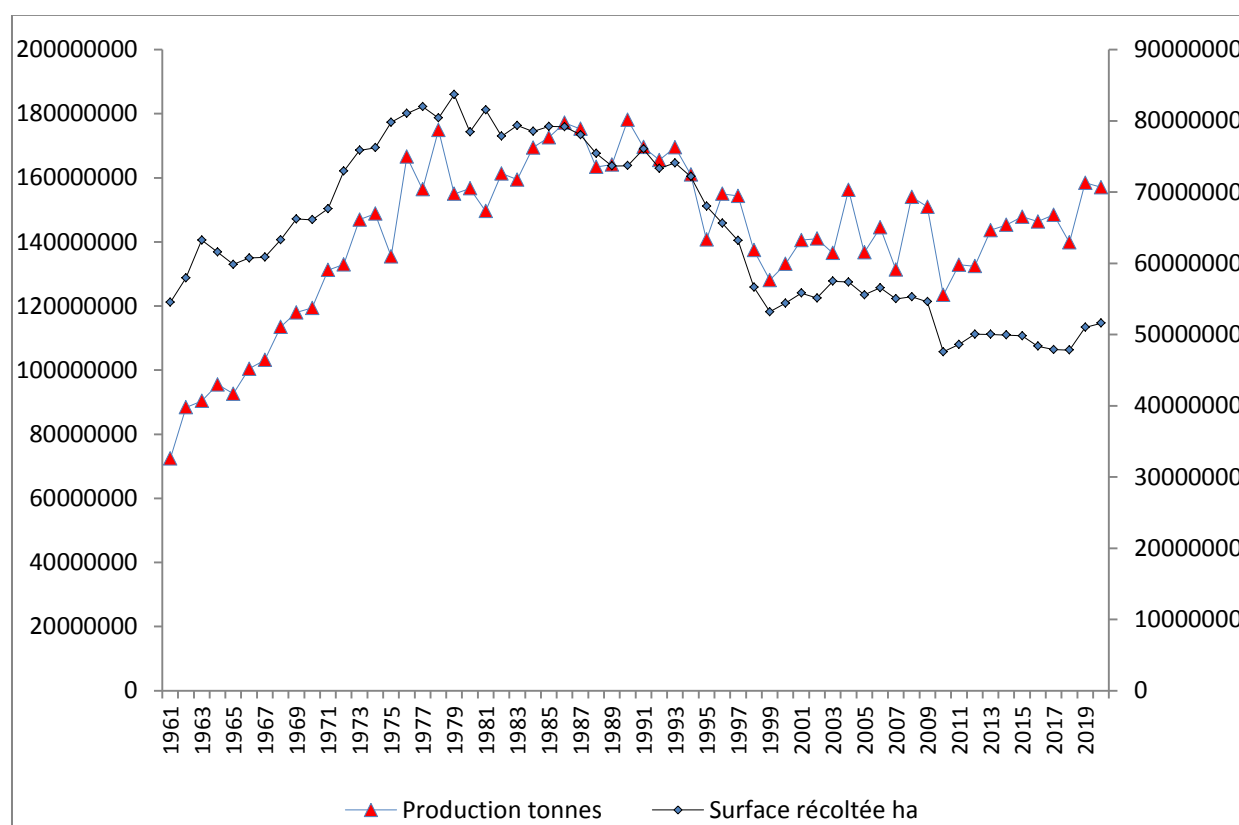


Figure 4. Productions mondiales et superficies récoltées de l'orge de la période 1961 à 2020 (FAOSTAT, 2021)

A l'horizon de 2019/2020, la production mondiale d'orge atteindrait 158 Mt contre 138 Mt cinq ans auparavant. L'augmentation de 10 Mt par an serait juste suffisante pour couvrir la demande mondiale, selon le Conseil international des céréales (CIC). La hausse attendue de 8 % de la production mondiale d'orge sera liée à celle de la surface cultivée. Elle atteindra 51 millions d'hectares en 2020 contre 47 millions en 2018.

La culture de l'orge présente de nombreux intérêts agronomiques et économiques. La plante est entre autre fortement appréciée comme alternative à la culture de blé dans les assolements.

La figure 4 illustre les principaux pays producteurs de l'orge, il est constaté que La Russie est premier producteur de l'orge (16 991 907 tonnes), suivi par l'Australie (9 253 852 tonnes), ensuite l'union européenne qui produit (7639292 tonnes).

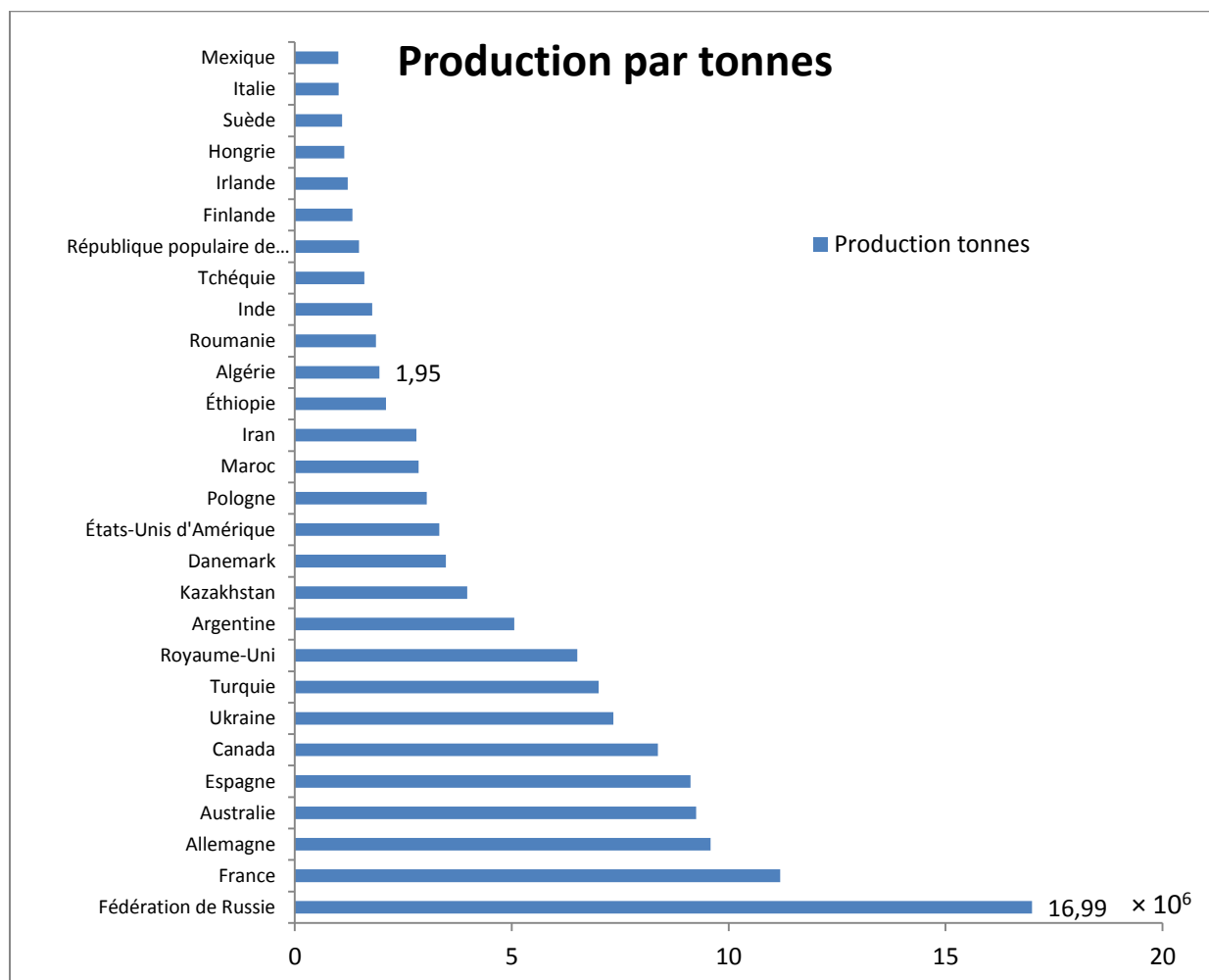


Figure 5. Production d'orge des principaux pays producteurs de l'année 2019/20 (FAOSTAT, 2021)

4.2. Production nationale

Les céréales d'automne (blé dur, blé tendre et orge) demeurent l'aliment de base des régimes alimentaires et revêtent une importance stratégique dans la nutrition humaine et l'alimentation animale. De fait, elles occupent une place privilégiée dans l'agriculture ce qui confirme leur caractère stratégique dans l'économie nationale.

En Algérie, la culture de l'orge est localisée au sud des hauts plateaux à la limite de la zone réservée à la culture du blé dur qui est relativement plus exigeante. Les superficies réservées à cette espèce sont relativement constantes et se situent au-dessus d'un million d'hectares. Quant aux quantités récoltées, elles restent très variables et ce, suites aux effets des contraintes agro-climatiques, notamment les effets des stress de fin de cycle (Benbelkacem, 2013).

Ainsi au cours de la période 1961 à 2020 (figure 5), les superficies récoltées ont varié de 0,2 à 1,6 millions d'hectares, avec une moyenne de 855 729 hectares, la production a varié de 0,1 à 2,2 millions de quintaux.

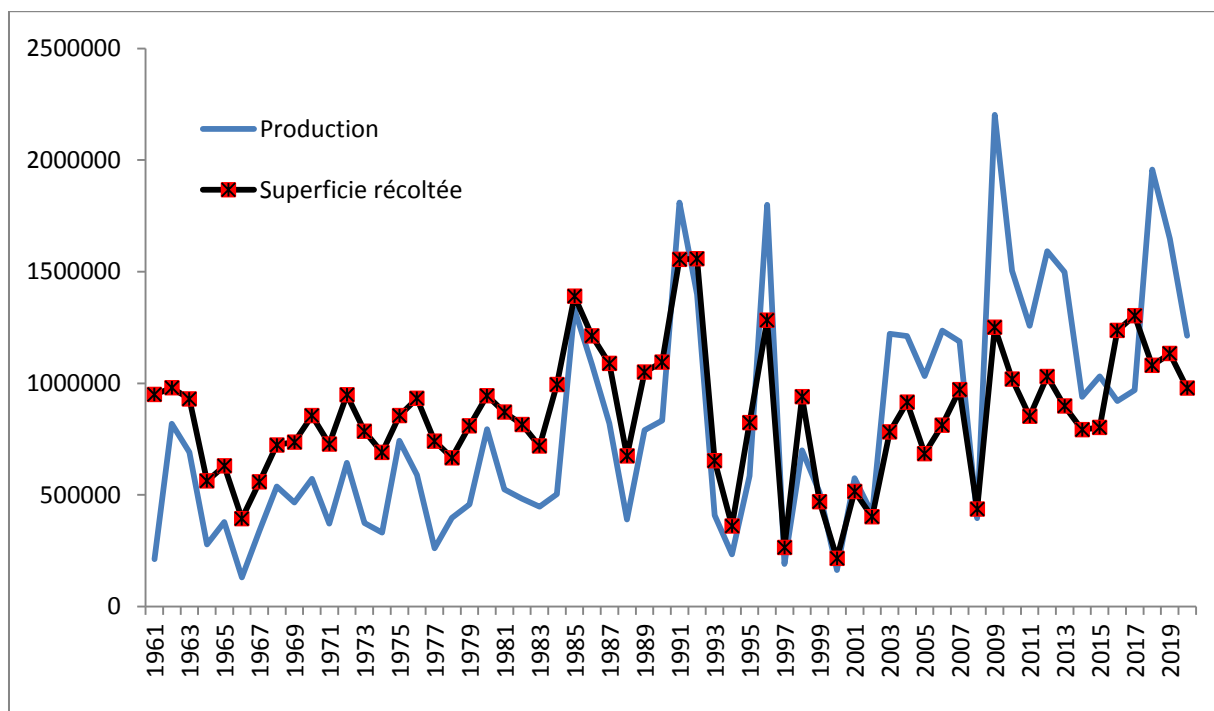


Figure 6. Productions et superficies récoltées de l'orge de la période 1961 à 2020 (FAOSTAT, 2021)

La figure 7 montre les fluctuations des rendements de l'orge, le rendement a oscillé de 2.2 à 18.0 q/ha ; soit des moyennes de 7.2 millions de quintaux pour la production et 8.4 q/ha pour le rendement. Depuis la fin des années 1980, on note comparativement aux superficies emblavées qui restent plus ou moins constantes, une tendance à l'augmentation des rendements et de la production.

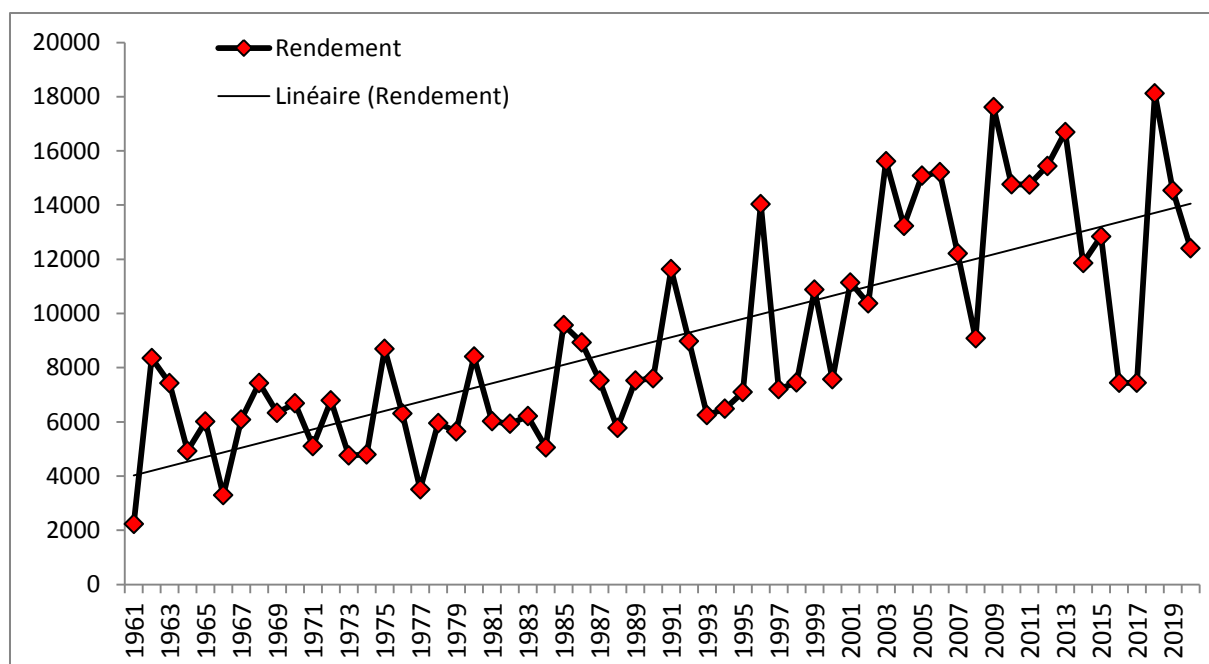


Figure 7. Rendements de la culture de l'orge de la période 1961 à 2020 (FAOSTAT, 2021)

Les productions des pays Magrébins, moyennes décennales des soixante dernières années sont indiquées en **figure 8** et on relève que l'Algérie, qui produit en moyenne plus de 1.6 millions de tonnes, se classe en seconde position après le Maroc. Quant à la production mondiale de l'orge, celle-ci a varié, au cours de cette même période, de 120 à 178 millions de tonnes (FAO, 2021).

Dès sa domestication, l'orge était utilisée en alimentation humaine (Ceccarelli et al., 2010). De nos jours, elle est remplacée peu à peu par les blés, le maïs et le riz selon les régions et prend, de plus en plus, des destinations fourragères et industrielles (Amri et al., 2005). Elle reste cependant encore utilisée en alimentation humaine dans certaines régions comme au Maroc, en Chine, en Inde et en Ethiopie où elle est utilisée pour fabriquer des galettes et du couscous (Grando et al., 2006).

Du point de vue biochimie, l'orge n'est pas toxique mais elle contient plusieurs allergènes et certains facteurs antinutritionnels. Ainsi chez certaines personnes, l'inhalation de la farine de l'orge cause l'asthme, connue sous le nom d'asthme du boulanger. Cet allergène est associé à la présence de certaines protéines issues de la trypsin-alpha-amylase (Sanchez-Monge et al., 1992).

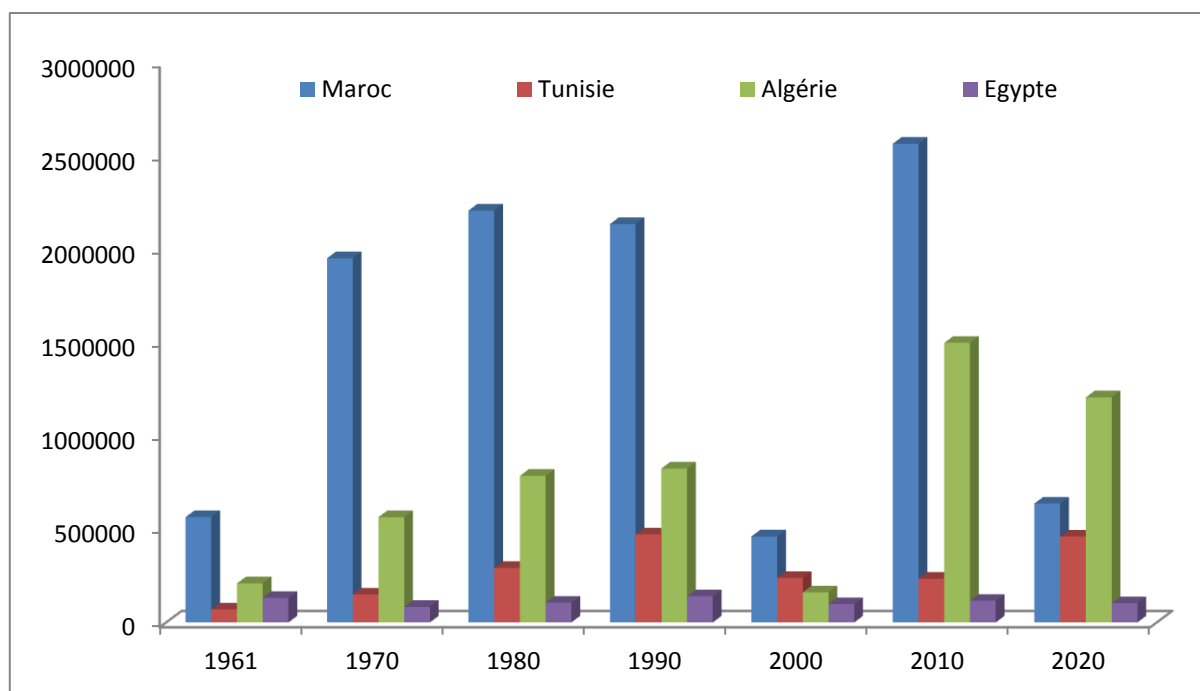


Figure 8. Production d’orge des pays Maghrébins des 60 dernières années (FAOSTAT, 2021)

Chapitre 2. L'eau virtuelle

1. Concept d'eau virtuelle

Le concept d'eau virtuelle a été introduit dans les années 1990, dans un contexte d'économie politique et l'idée est maintenant reconnue comme étant pluridisciplinaire. Le concept d'empreinte hydrique s'inspire largement des sciences fondamentales de la météorologie, de la physiologie des plantes, des sciences du sol et de l'agronomie afin de trouver un moyen de mesure. Elle se prête à aider à comprendre l'eau non seulement comme un bien économique et social, mais aussi comme une ressource naturelle.

Le concept d'empreinte hydrique est largement utilisé pour relier le mode de consommation à l'affectation des ressources. L'empreinte hydrique de l'agriculture est estimée sur la base de la demande spécifique en eau pour les cultures. La méthodologie de quantification de l'eau des cultures sur la base de l'évapotranspiration, développée par la Food and L'Organisation des Nations unies pour l'agriculture (FAO) est largement utilisée pour estimer l'empreinte de l'eau. Les estimations de l'empreinte hydrique mondiale pour l'agriculture et les produits animaux ont été évaluées pour des périodes allant de 1986 à 2010 dans diverses études. Les empreintes pour les pays / régions, les secteurs et pour des produits spécifiques ont été estimées. Le concept est désormais considéré comme une idée similaire aux empreintes carbone et écologique et des efforts d'unification de ces indicateurs de consommation sont également tentés. Le concept d'empreinte eau, cependant, a été critiqué pour être juste une mesure indirecte abstraite de l'efficacité d'utilisation de l'eau et rien de plus (**Kokila, 2016**).

La question de savoir si «empreinte eau» et «eau virtuelle» peuvent être traitées comme des synonymes est toujours en débat. Cependant, en tant que mesures de l'eau contenue dans un produit, ils peuvent être utilisés de manière interchangeable. Le domaine d'étude a évolué depuis son introduction et la littérature s'est épanouie, mais les analyses et les méthodologies sont encore en évolution.

Les études antérieures pertinentes sont examinées dans les paragraphes suivants et ont été classées par ordre chronologique afin de comprendre l'évolution du concept au cours des deux dernières décennies.

Allan (1998) a introduit le concept de l'eau virtuelle comme un instrument pour parvenir à la sécurité régionale de l'eau et un outil politique pour résoudre les problèmes géopolitiques dans les pays du Moyen-Orient confrontés à de graves déficits en eau.

Falkenmark et Roockstrom (2006) ont exprimé la teneur virtuelle en eau d'un produit comme étant constituée de trois composants. L'eau virtuelle «verte» est le volume d'eau de pluie qui s'est évaporée pendant la production et l'eau virtuelle «bleue» est le volume d'eau de surface ou d'eau souterraine qui s'est évaporée pendant la production. Celles-ci concernent principalement les produits agricoles, où elles se réfèrent à l'évapotranspiration totale du champ pendant la période de croissance de la culture. L'eau virtuelle «grise» est le volume d'eau qui est pollué au cours du processus de production.

Hoekstra et Hung (2005) quantifient les volumes de flux d'eau virtuels à travers le commerce international des cultures entre les nations au cours de la période 1995-1999 et analysent également les bilans hydriques virtuels nationaux en relation avec les besoins nationaux en eau et la disponibilité en eau. L'approche de base consiste à multiplier les flux commerciaux internationaux des cultures par leur teneur en eau virtuelle associée. La consommation totale d'eau par les cultures dans le monde a été estimée à $5400 \times 10^9 \text{ m}^3 / \text{an}$ et le volume global du débit d'eau virtuel international lié aux cultures entre les nations était de $695 \times 10^9 \text{ m}^3 / \text{an}$. L'étude ne prend en compte que les cultures importantes et exclut les produits végétaux. L'Inde figurait parmi les plus grands exportateurs nets d'eau virtuelle.

Kumar et Singh (2005) ont montré que l'excédent ou le déficit virtuel d'eau d'un pays n'est pas uniquement déterminé par sa situation en matière d'eau. Ils ont conclu qu'il n'existait aucune corrélation entre la disponibilité relative de l'eau dans un pays et le commerce virtuel de l'eau. Plusieurs pays riches en eau, dont le Japon, le Portugal et l'Indonésie, ont enregistré des importations nettes d'eau virtuelle élevées. Ils ont également montré que l'accès aux terres arables peut être un moteur clé du commerce virtuel de l'eau.

Ma et al., (2006) ont quantifié le commerce virtuel de l'eau en Chine dans le contexte du projet de transfert Sud-Nord. L'étude a révélé que le nord de la Chine exporte $52 \times 10^9 \text{ m}^3 / \text{an}$ d'eau virtuelle vers le sud de la Chine, un volume supérieur au volume maximal de transfert d'eau proposé ($38 - 43 \times 10^9 \text{ m}^3 / \text{an}$) dans le cadre du projet.

Ils ont conclu que si la direction perverse du commerce virtuel de l'eau en Chine peut être inversée, cela peut constituer une meilleure alternative au transfert physique de l'eau entre les bassins. **Verma et al., (2007)** présentent un résultat similaire pour l'Inde.

Verma (2007) a estimé qu'au niveau actuel de production et de consommation, le lait et les produits laitiers ne sont pas susceptibles d'ajouter de manière significative aux flux d'eau

virtuels interétatiques, car l'Inde dans son ensemble est un excédent de lait et les niveaux de consommation dans les États qui produisent moins de lait sont bien en deçà des normes prescrites pour la sécurité nutritionnelle. Dans un scénario de sécurité nutritionnelle où les normes nutritionnelles minimales sont respectées dans chaque état, on peut s'attendre à des flux d'eau virtuels interrégionaux de l'ordre de $40 \times 10^9 \text{ m}^3 / \text{an}$.

Brown et al., (2009) fournissent une estimation de la teneur en eau virtuelle des cultures et du bétail au niveau du bassin versant. L'étude met en évidence la nécessité de disposer d'informations sur les besoins en eau à l'échelle du bassin versant / du bassin hydrographique. La production de baies dans la vallée du bas Fraser (une région humide) était une activité économique importante évaluée à 93 millions de dollars et nécessitant $32 \text{ Mm}^3 / \text{an}$ d'eau, tandis que les vergers et vignobles du bassin de l'Okanagan (une région sèche) avaient une valeur estimée de \$ 68 millions mais a nécessité le double de l'eau. Des estimations détaillées de l'efficacité de l'eau constituent la base pour déterminer les compromis et permettent une meilleure allocation des ressources.

Jiang et Marggraf (2015) estiment que l'Allemagne a exporté 192 millions de m^3 d'eau virtuelle vers la Chine et importé 801 millions de m^3 de Chine, ce qui a permis d'économiser 69,8 millions de m^3 pour l'Allemagne et une perte nette d'eau de 469,4 millions de m^3 pour la Chine, laissant perte d'eau. La perte provient de la différence d'efficacité d'utilisation de l'eau entre ces deux pays et il est suggéré que l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau en Chine atténuerait cette perte mondiale d'eau et augmenterait également la valeur de l'eau par unité en Chine.

Zella et Smadhi (2020) ont analysé le concept de l'eau virtuelle des céréales en Algérie, ils ont abouti aux conclusions suivantes 'de doubler la sole céréalière actuelle afin de combler les besoins en céréales, ce qui permettrait de s'affranchir des importations massives de blé et du prétexte illusoire que l'Algérie bénéficie des dizaines de milliards de m^3 d'eau 'virtuelle'.

2. L'eau virtuelle sans les relations internationales

L'eau virtuelle joue un rôle dans les échanges entre pays, notamment les échanges de produits agricoles. En effet, un pays dont les ressources d'eau sont faibles n'a pas intérêt à exporter des produits, par exemple des fruits ou de la viande, dont la production requiert une grande quantité d'eau. Des pays comme la Jordanie et Israël orientent certaines de leurs exportations en fonction de l'eau consommée. Le Conseil mondial de l'eau tente d'évaluer les flux

mondiaux d'eau virtuelle. D'après les calculs de **Hoekstra et al.**, en 2003, le continent américain, l'Asie du Sud-Est et l'Océanie seraient les principaux exportateurs d'eau virtuelle, les importateurs les plus importants étant l'Afrique du Nord, l'Europe de l'Ouest et l'Asie centrale et du Sud.

Le choix de développer des cultures gourmandes ou, à l'inverse, économes en eau, par exemple en vue de l'exportation, peut avoir des conséquences importantes sur le plan géopolitique lorsqu'un pays occupe la partie amont d'un bassin fluvial. Les pays situés en aval recevront en effet plus ou moins d'eau selon le type de culture ou d'exploitation de ses terres que le pays en amont aura décidé d'adopter. L'idée d'eau virtuelle doit donc être prise en compte dans les coopérations régionales entre pays.

En 2008, le Royaume-Uni est le sixième plus grand importateur net d'eau au monde derrière le Brésil, le Mexique, le Japon, la Chine et l'Italie. Seulement 38% de la consommation totale d'eau du Royaume-Uni provient de ses propres ressources; le reste dépend des systèmes d'eau d'autres pays, dont certains font déjà face à de graves pénuries. Les Britanniques consomment en eau potable environ 150 litres par personne, mais ils consomment environ 30 fois plus d'eau virtuelle (4 645 litres par personne par jour), utilisée dans la production d'aliments et de textiles importés. Des quantités énormes de denrées alimentaires et de coton y sont consommées, cultivés dans les régions les plus sèches du monde où les ressources en eau sont déjà très sollicitées. Le WWF identifie l'Espagne, les pays d'Afrique du Nord, notamment l'Égypte et le Maroc, l'Afrique du Sud, Israël, le Pakistan et l'Ouzbékistan comme les pays confrontés à stress hydrique aigu fournissant au Royaume-Uni des exportations substantielles en eau.

Le Belge dépasserait ce chiffre avec 7 400 litres par personne par jour consommés, dans des produits d'importation tels que coton, café, soja et blé.

3. Quelques ordres de grandeur

D'après le Conseil mondial de l'eau, la quantité d'eau nécessaire pour produire divers types de nourriture varie considérablement selon le type de production. Le tableau numéro 1 montre les volumes d'eau nécessaire pour produire les produits de base de la nourriture.

Tableau 1. Le volume d'eau utilisé pour produire un kg de bien

La production d'un kg de	Le volume d'eau utilisé (litres)
Lait	790
Blé	1 160
Riz	1 400
porc	4 600
bœuf	13 500

4. Empreinte eau

L'**empreinte eau** (on parle également d'empreinte sur l'eau) est le volume total d'eau virtuelle utilisée pour produire un produit ou un service. Comme on le fait pour l'empreinte écologique, on peut également évaluer l'empreinte eau d'une entreprise, d'un pays, d'un individu, d'une ville etc. L'empreinte de l'eau ou *Water footprint* en anglais est un indicateur basé sur la consommation effective d'eau aux différents stades de la production d'un produit par le consommateur ou le producteur. On distingue l'eau verte, bleue et grise :

- l'eau **bleue** est l'eau captée pour les usages domestiques et agricoles. Elle est aussi définie comme l'eau douce de surface ou souterraine, autrement dit l'eau douce des lacs, des rivières et des aquifères ;
- l'eau **verte** est l'eau de pluie stockée dans le sol – humidité + évaporation + transpiration ;
- l'eau **grise** est l'eau polluée par les processus de production^{2,3}. Dans la terminologie émergente de l'empreinte eau, l'eau grise désigne aussi la quantité d'eau bleue nécessaire pour diluer suffisamment l'eau usée rejetée et rendre l'eau à nouveau disponible pour un autre usage.

Chapitre 3. Modèle CropWat

La modélisation est la traduction en langage mathématique de la description de processus physiques, biologiques, chimiques, etc. issus des observations et des expérimentations scientifiques menées depuis le début du XX^{ème} siècle. L'objectif principal est de « **faire parler les plantes** », c'est-à-dire de **connaître leur état et leurs besoins (présents ou futurs)**, quelles que soient les conditions climatiques, pédologiques, génétiques ou les techniques culturales.

A partir de ces connaissances, les acteurs de l'agriculture peuvent connaître l'évolution des besoins d'un végétal et **prendre des décisions tactiques et stratégiques** pour les travaux agricoles des jours à venir. Les agriculteurs peuvent ainsi gagner du temps, rationaliser leurs coûts, améliorer leurs techniques agricoles afin d'accroître la performance économique de leur exploitation tout en y intégrant les problématiques environnementales et d'économies des ressources. **Il n'est pas ici question de substituer les connaissances et habitudes des agriculteurs, mais plutôt de le conseiller dans leurs décisions : on parle ainsi d' « outils d'aide à la décision ».**

1. Définition d'un modèle

D'après **Penning De Vries et al.** (1989), un modèle est généralement défini comme une représentation ou une simplification du fonctionnement réel d'un système. Certaines définitions s'appuient sur les formalismes mathématiques, en effet, selon la définition du National Research Council (1990), un modèle est une tentative systématique de traduire la compréhension conceptuelle d'un système réel (phénomène physique, biologique...) en des termes mathématiques.

Par ailleurs, il est composé d'un ensemble d'équations mathématiques, appelées formalismes, constituées de variables d'état, qui caractérisent l'état du système à différents pas de temps mais aussi de paramètres, qui définissent l'intensité des relations entre les variables d'état de ce système.

2. Typologie des modèles

On distingue généralement deux types de modèles de culture qui sont les suivants:

2.1. Les modèles mécanistes

Ils décrivent et quantifient les mécanismes et les processus qui interviennent au niveau de la plante et du sol. Cela se fait en se basant sur la formalisation d'hypothèses concernant le fonctionnement physiologique et physique du système étudié.

2.2. Les modèles empiriques

Ils décrivent quant à eux l'évolution du système au travers de 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.

3. Etapes de l'élaboration du modèle

D'après **Zella (2010)**, la méthodologie de l'élaboration d'un modèle s'articule séquentiellement sous les étapes suivantes :

3.1. Caractérisations

C'est l'étape fondamentale et le point de départ de tout processus de modélisation. Elle consiste à choisir le modèle à partir d'une analyse de l'objet défini en tant que système, de proposer les relations les plus aptes à représenter son comportement. La caractérisation équivaut à une postulation de principe, facilitée par une bonne connaissance théorique de l'objet.

3.2. L'identification

Dénommée calage ou calibration, consiste à attribuer aux paramètres structuraux, les valeurs numériques afin de minimiser l'écart entre les réponses calculées du modèle et les réponses du témoin ou références.

3.3. La vérification

Est une étape qui devrait aboutir à la consolidation du modèle par la représentativité et la conformité des résultats.

3.4. L'exploitation

Est l'ultime étape qui permet de vérifier que les entrées pour lesquelles le modèle est exploité appartiennent bien à la même classe que celles prises comme référence.

4. Modèle CropWat

Le Cropwat est un logiciel d'aide à la gestion de l'irrigation, il a été mis au point par la FAO en 1992, basé sur la formule de Penman - Monteith modifiée. Il permet le calcul des besoins en eau des cultures et des quantités d'eau d'irrigation, basés sur les Bulletins d'irrigation et de drainage FAO-24 et 33. Il offre également la possibilité de développer un calendrier d'irrigation en fonction de diverses pratiques culturales, et d'évaluer les effets du manque d'eau sur les cultures et l'efficacité de différentes pratiques d'irrigation.

4.1. Les données d'entrées requis par le logiciel

Les données nécessaires pour le fonctionnement de logiciel sont détaillées Dans le tableau 02

Tableau 02. Les données d'entrées du modèle CropWat

Climat	<ul style="list-style-type: none"> - Pluie (mm) - Température minimale et maximale(C°) - Humidité relative (%) - Vitesse du vent (m/s) -Insolation (heures)
Culture	<ul style="list-style-type: none"> - Date de plantation et de récolte - Stades phénologiques - Profondeur d'enracinement - Coefficient cultural (kc) - Hauteur de la culture - Cycle de la culture
Sol	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'horizon - Densité apparente - Perméabilité - les teneurs en eau du sol à saturation (Θ_{sat}), à la capacité de champ (Θ_{FC}) et au point de flétrissement permanent (Θ_{PF}).
Conditions initiales	<ul style="list-style-type: none"> - L'eau disponible initiale

4.2. Les sorties du modèle

Les données fournies par le logiciel sont illustrés dans le tableau 03

Tableau 03. Les données de sorties du modèle CropWat

Les sorties du modèle CropWat
- Evapotranspiration potentielle
- Pluie efficace
- Besoin en eau d'irrigation
- Besoin en eau des cultures
- Calendrier d'irrigation
- Irrigation brute total
- Irrigation nette totale
- Déficit d'eau à la récolte
- Efficience des précipitations
- Perte d'irrigation

MATERIELS ET METHODES

I. Présentation de la zone d'étude

1. Situation géographique

La ville de Tiaret est localisée au nord-ouest de l'Algérie à 300 km au sud-ouest de la capitale algéroise, sur les hauts plateaux ouest entre la chaîne de tellienne au nord et la chaîne atlasique au sud. Avec une population de 846 823 habitants, elle s'étend sur une superficie de 20.399,10 km², et est délimitée par des villes de Tissemsilt et Relizane au nord, la ville de Laghouat au sud, les villes de Mascara et Saïda à l'ouest et par la ville de Djelfa et Médéa à l'est.

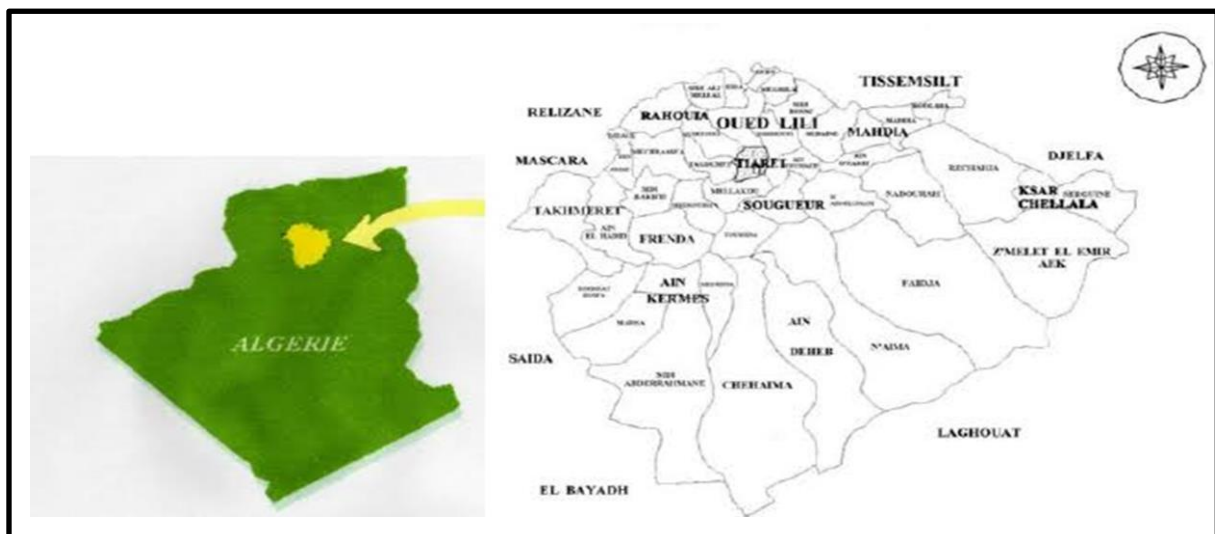


Figure 9 : Localisation de la Tiaret (Wikipédia)

Cette position privilégiée fait que la ville de Tiaret est un carrefour entre divers ville et régions du pays. Elle est également une zone de passage entre les régions montagneuses au nord, les hautes plaines au centre et les espaces semi-arides au sud.

2. Choix de la zone d'étude

La surface totale de la commune de Tiaret est de 12270 ha, plus des trois quarts des terres de la commune, soit 9204 ha sont agricoles. Ces terres sont occupées essentiellement de grandes cultures céréales et légumineuses, tandis que les cultures maraîchères et cultures fruitières viennent au second rang.

3. Climatologie

Le climat de la région est caractérisé par deux périodes principales qui expriment le contraste important qui sévit durant l'année à savoir :

- ❖ Un hiver froid relativement humide, des chutes de neige la température moyenne enregistrée est de 7,2° C.
- ❖ Un été chaud et sec avec une température moyenne de 29° C.

4. Relief et géomorphologie

L'analyse des photographies aériennes (1/100.000), permet d'identifier quatre unités géomorphologiques distinctes et plus ou moins homogènes (**Duvignaud, 1992**). Il s'agit de : l'unité des bas piémonts l'Ouarsenis, l'unité des collines de Tiaret, l'unité du plateau du Sersou et les parcours steppiques.

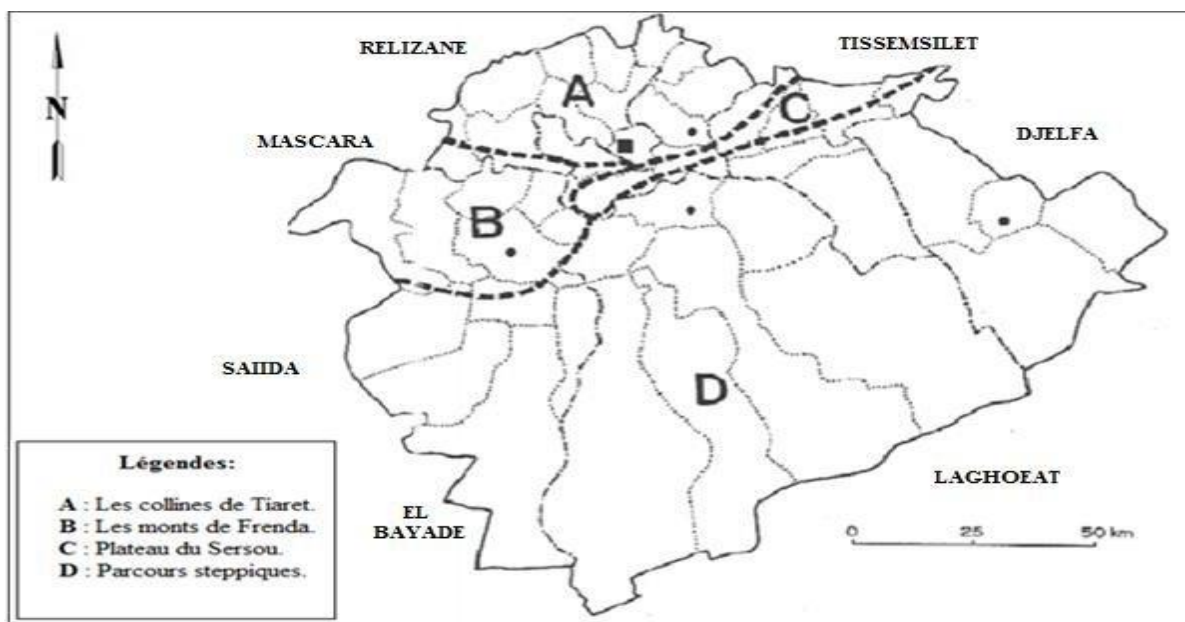


Figure 10 : Les régions naturelles de la wilaya de Tiaret (**Duvignaud, 1992**).

D'une manière globale le relief est caractérisé par le versant méridional du chaînon de l'Atlas tellien (Ouarsenis) qui constitue sa limite septentrionale, au Sud-Ouest par les monts de Frenda.

5. Pédologie

Selon le Moumene (1993) plus les travaux effectués au département de pédologie de l'ISA de Tiaret de 1990 à 1998, il s'avère que la classe la plus dominante dans la zone

d'étude, est la classe des vertisols qui regroupe les vertisols proprement dit et/ou toutes les autres unités de caractère vertique (isohumique à caractère vertique, calcimagnésien à caractère vertique, cette classe s'étend sur plus de 32 % de la surface totale. Ensuite les sesquioxydes de fer sur 30% de la surface totale. Les sols rouges méditerranéens peu lessivés et les sols bruns calcaires s'étendent sur 13% de la surface totale.

6. Ressources en eau

D'après le site officiel de la direction d'hydraulique (**DH, 2014**), les nappes aquifères reconnues à travers le territoire de la Wilaya recèlent d'importantes ressources hydriques dont 53% sont utilisées au profit de l'alimentation en eau potable, à l'irrigation et l'alimentation des unités industrielles.

La région peut être découpée en plusieurs zones relativement homogènes du point de vue caractéristiques hydrogéologiques :

La zone Nord : elle est constituée par le cœur du massif de l'Ouarsenis; ces piémonts Sud sont les monts de Tiaret et la vallée de la Mina qui se trouvent à l'aval du Barrage Bakhada.

La zone Ouest : elle comporte les bassins de l'Oued Taht, l'Oued Abd et le versant Nord du Chott Chergui. Les terrains aquifères de cette zone sont les dolomies et les calcaires du Jurassique moyen et inférieur. Les terrains du Chott chergui ont été cartographiés comme étant de l'âge du Sénonien, mais d'après des études ultérieures, ils seraient rattachés au Jurassique moyen.

La zone Est : elle comprend le plateau du Sersou et la plaine de Ksar Chellala. Elle est limitée au Nord par la vallée de l'oued Nahr Ouassel, à l'Est par les Oueds Touil et Ouerk, à l'Ouest par la remontée des marnes miocènes dans la région de Sidi Elhaoues. Dans cette zone, il existe une nappe phréatique dont le remplissage est continental mio-plioquaternaire.

- ✚ **La Vallée du Touil** : dont l'aquifère principal est le continental intercalaire.
- ✚ **Les Monts de Chellala** : ils se localisent entre la plaine de Ksar Chellala au Nord, et la vallée de l'Oued Touil au Sud. Ils correspondent à un horst formé de terrain Jurassique essentiellement des calcaires et des dolomies du Kimmeridgien et du Portlandien-Tithonique
- ✚ **La Vallée de haute Mina** : joue le rôle de drain naturel des terrains marno-calcaires du Jurassique Supérieur et du crétacé qui forme son bassin versant.

II. Evaluation des besoins en eau de la culture de l'orge par CropWat

Pour déterminer les besoins en eau d'une culture, on nécessite de connaître les paramètres suivants :

- ✚ Les données climatiques que fournissent les informations concernant les besoins en eau de la culture ;
- ✚ Les paramètres pédologiques que permettent d'estimer la réserve utile du sol ;
- ✚ Les données culturales que détermine la réserve en eau facilement utilisable par la plante, sur la base de sa profondeur racinaire.

1. Les données climatiques

Les données climatiques requises par le CropWat sont les températures minimales, maximales (°C), les précipitations (mm), la vitesse du vent (m/s) à 2 m au-dessus du sol, la radiation solaire (W /m²) et l'humidité relative (%).

Mois	Temp Min	Temp Max	Humidité	Vent	Insolation	Ray.	ETo
	°C	°C	%	km/jour	heures	MJ/m²/jour	mm/jour
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre							
Novembre							
Décembre							
Moyenne							

Figure 11. Les données climatiques entrées dans le Cropwat

2. Les données liées à la culture

Pour pouvoir déterminer les besoins en eau d'une plante, Cropwat a besoin de connaître différents paramètres propres à cette dernière. Pour cela, nous entrons les caractéristiques de chaque phase de développement de la plante. Ces caractéristiques étant la durée de chaque phase, paramètre variant suivant le lieu de culture et la période de l'année. Le logiciel divise la vie de la plante en 4 étapes (initiale, développement, mi-saison, et enfin

arrière-saison). Le coefficient cultural K_c , qui est le rapport de l'évapotranspiration maximale d'une culture pendant une période déterminée de son cycle végétatif c'est-à-dire dans des conditions optimales, sur l'évapotranspiration potentielle.

3. Les données liées au sol

Les données relatives au sol sont nécessaires dans le pilotage des irrigations pour la détermination de la réserve utile (RU) qui est liée à deux facteurs :

❖ La texture

Les valeurs de RU selon les différentes textures de sol considérées généralement sont d'après la FAO (1987) :

- sol grossier : 60 mm/m ;
- sol sableux : 100 mm/m ;
- sol limoneux : 140 mm/m ;
- sol argileux : 180 mm/m.

❖ La profondeur d'enracinement de la culture

Données générales sur le sol		
Nom du sol	Light (sand)	
Eau disponible totale (CC - PF)	60.0	mm/mètre
Taux d'infiltration maximum de l'eau de pluie	40	mm/jour
Profondeur maximum d'enracinement	500	centimètres
Épuisement de la teneur en eau initiale (en % TAM)	0	%
Eau disponible initiale	60.0	mm/mètre

Figure 12. Données sur les caractéristiques du sol

4. Calcul l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration de référence (ET_0) a été calculée selon la méthode Penman-Monteith de la FAO (Allen et al., 1998). Celle-ci nécessite comme données d'entrées

la température (minimale et maximale), l'humidité (minimale et maximale) ainsi que la radiation solaire et la vitesse du vent à 2 mètres au-dessus du sol.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) d + \gamma \frac{37}{t + 273} v (e_w - e)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{208} v \right)}$$

Où

ET0 évapotranspiration de référence (mm/h),

Rn rayonnement net (W/m²),

G flux de chaleur du sol (W/m²),

d : longueur du pas de temps en k secondes (d=3.6 10⁻³ ks)

t température moyenne horaire de l'air (°C),

Δ pente de la courbe de la tension de vapeur saturante (kPa/°C),

γ Constante psychrométrique (kPa/°C),

e tension de vapeur à la température t (kPa),

e_w tension de vapeur saturante (kPa),

v vitesse moyenne du vent à 2 m (m/s).

5. Calcul la pluie efficace

La pluie efficace est définie comme la partie de la pluie qui est effectivement utilisée par la culture après que les pertes de pluie dues au ruissellement de surface et à la percolation profonde ont été prises en compte. La pluie effective est la pluie utilisée en fin de compte pour déterminer les besoins d'irrigation des cultures. Elle est calculée selon la méthode de l'USDA (United States Department of Agriculture) basée sur l'équation suivante:

$$P_{eff} = P_{mois} \times (125 - 0.2 \times P_{mois}) / 125 \quad \text{pour } P_{mois} \leq 250 \text{ mm}$$

$$P_{eff} = 125 + 0.1 \times P_{mois} \quad \text{pour } P_{mois} > 250 \text{ mm}$$

Où: P_{eff} = Pluie efficace, P_{mois} = Pluie mensuelle

6. Calcul les besoins en eau des cultures (ETM)

En matière d'irrigation, on cherche à placer les plantes dans des conditions de production optimales et on base l'irrigation sur la valeur de l'évapotranspiration maximale (ETM) qui est une valeur ponctuelle liée à l'ET0 qui est relative à une région par un coefficient cultural, donnée par la formule de base de l'approche climatique :

$$ETM = kc \times ET0$$

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Analyse des paramètres climatiques

1.1. La pluie

La figure 13 illustre la variabilité interannuelle de la pluviométrie durant de la série climatique (1992 à 2021).

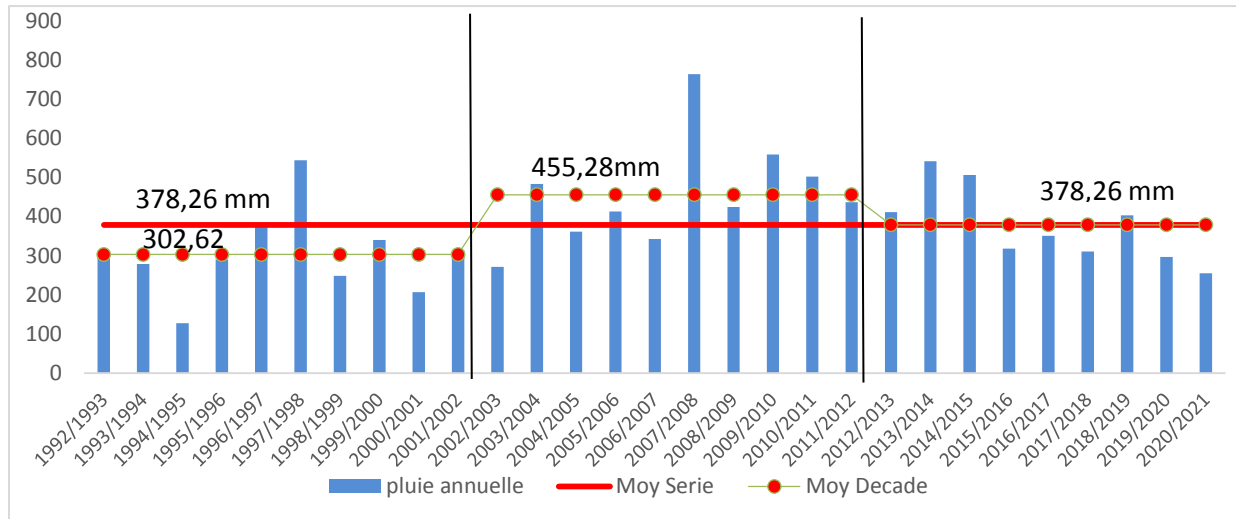


Figure 13. Variabilité interannuelle de la pluie (1992-2021)

Il est constaté que la valeur moyenne annuelle de la pluie estimée sur la période d'étude (1992-2021) est de l'ordre de 378,26 mm. Les résultats obtenus montrent que l'année excédentaire est 2007/2008 et l'année déficitaire est 1994/1995.

1.2. Température

Les relevés moyens annuels des températures enregistrées sur la période d'étude (1992-2021) sont présentés dans la figure 14. D'après cette figure, il est déterminé que la moyenne mensuelle du mois le plus froid est 0,12°C et celle du mois le plus chaud est de 35,35°C, elle correspond, respectivement pour le mois janvier et juillet.

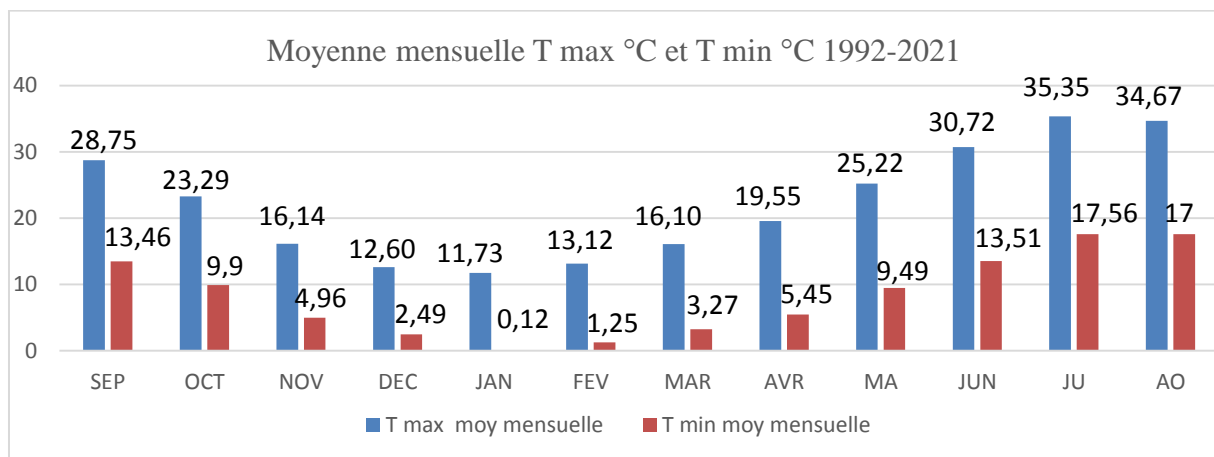


Figure 14. Température moyennes mensuelles (1992-2021)

1.3. Humidité relative

L'humidité relative est la quantité d'eau présente dans l'air qui contrôle l'évaporation du sol et le couvert végétal. L'humidité moyenne mensuelle pour la période d'étude (1992-2021) est illustrée par figure15. Il est constaté que le mois le plus humide est le décembre avec 76,44% et le juillet est le mois moins humide avec 36,49%.

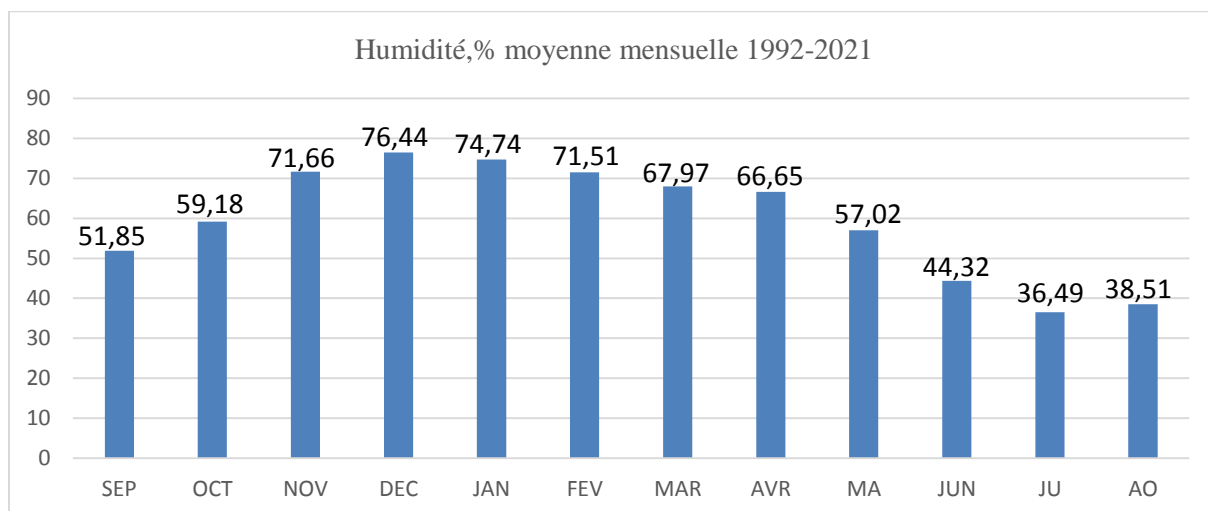


Figure15. Humidité relatives, moyennes mensuelles (1992-2021)

1.4. Insolation

La variation de la durée d'ensoleillement est illustré dans la figure numéro 16, il est constaté que sur toute la période climatiques (1992/2021) le mois le plus ensoleillé est juin avec 11,67 h et le mois le moins ensoleillé correspond au mois de décembre avec 6,2 h.

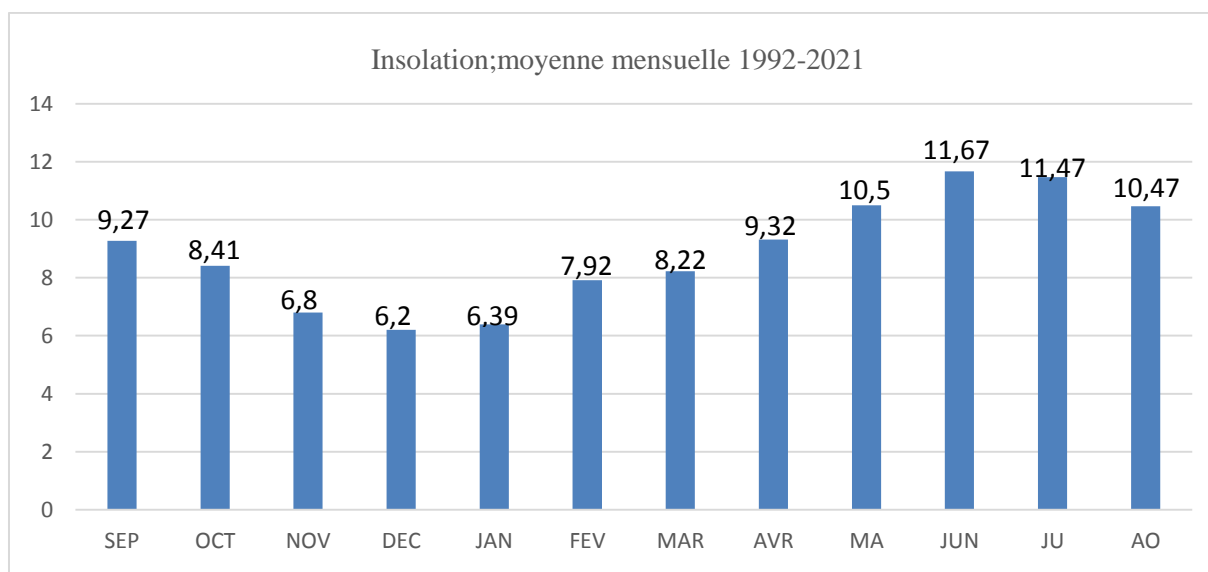


Figure16. L'insolation moyenne mensuelle de la région de Tiaret (1992-2021)

2. Calcul de l'évapotranspiration de référence

2.1. A l'échelle annuelle

L'ET₀ qui a été calculée selon la méthode Penman-Monteith de la FAO (Allen et al. 1998). Celle-ci nécessite comme données d'entrées la température (minimale et maximale), l'humidité (minimale et maximale) ainsi que la radiation solaire et la vitesse du vent à 2 mètres au-dessus du sol. Il est présenté par la figure numéro 17, d'après cette figure, il est constaté que la moyenne de la série choisie est de 997,87 mm, fluctue entre un minimum de 828,5 et un maximum de 1103,95 mm.

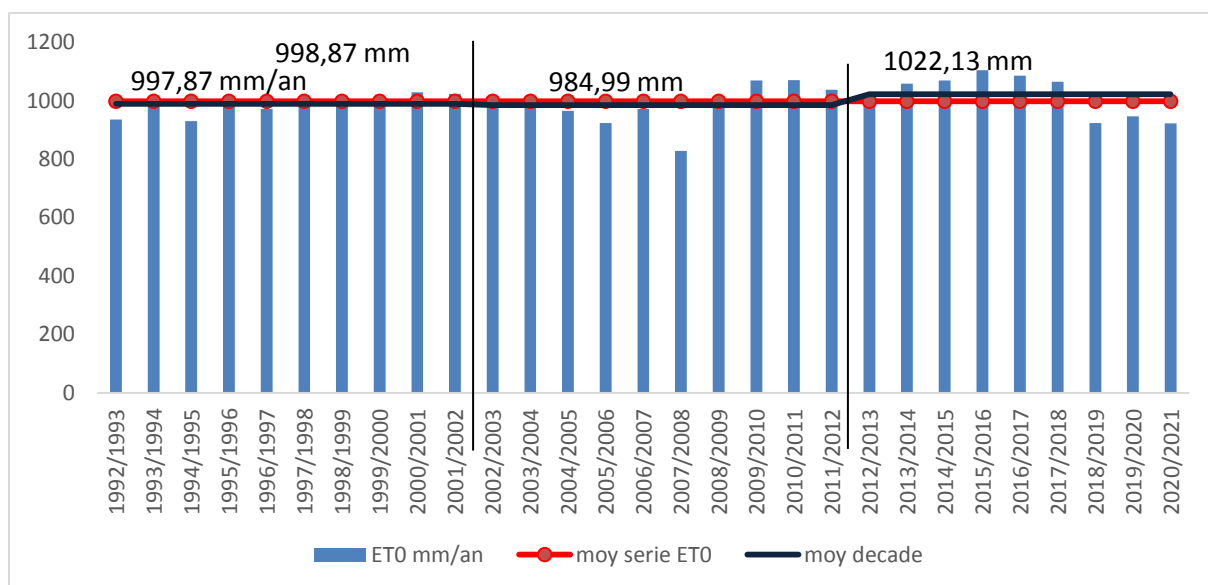


Figure 17. Variation interannuelle de l'évapotranspiration de référence (1992-2021)

2.2. A l'échelle saisonnière

La figure numéro 18 illustre la variation interannuelle de l'évapotranspiration de référence (ET₀) à l'échelle de la saison de croissance de culture de l'orge, sur une période d'étude (1992-2021). Il est constaté que la moyenne annuelle de l'ET₀ de l'orge est de 399,88 mm, fluctue entre un maximum de 483,81 mm et un minimum de 228,10 mm.

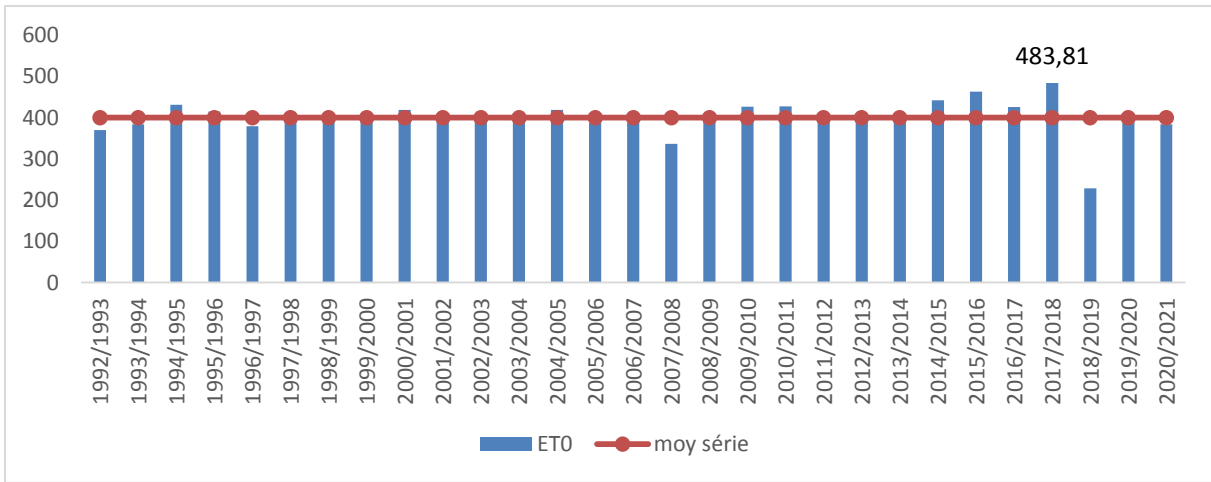


Figure 18. Variation interannuelle de l'évapotranspiration de référence à l'échelle de la saison de culture, période (1992-2021).

3. Calcul de la pluie efficace

3.1. A l'échelle annuelle

La pluie efficace constitue la pluie qui est effectivement utilisée par la culture, la figure numéro 19 illustre que la moyenne annuelle durant une période de 29 ans est de 343,10 mm, varie entre un minimum de 127,4 mm et un maximum de 680,9 mm.

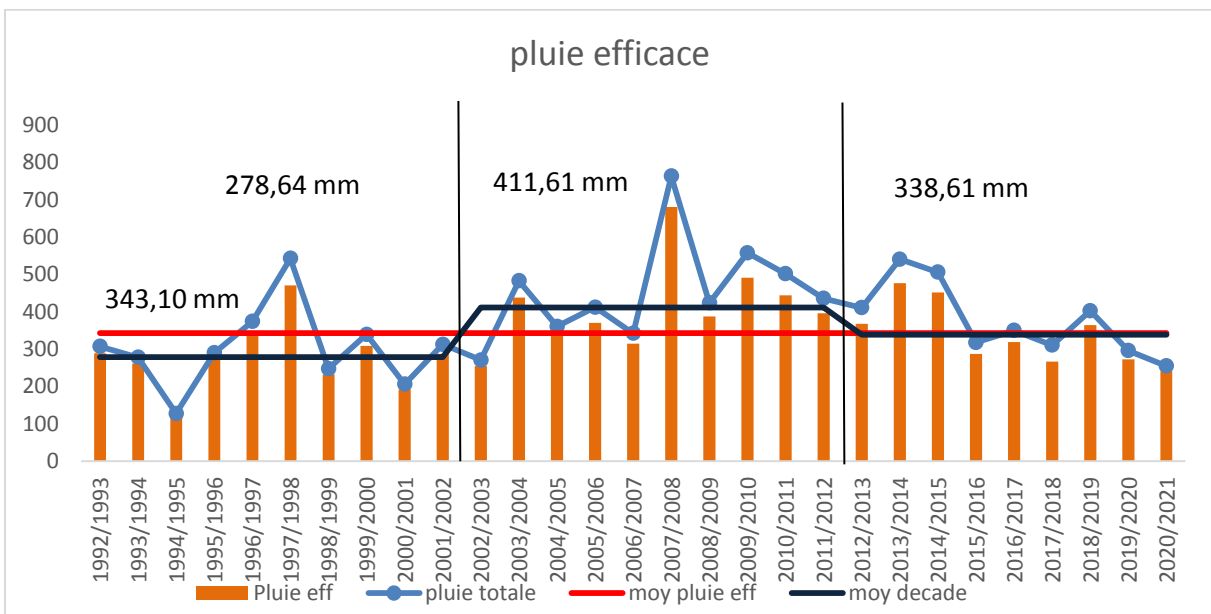


Figure 19. Variation interannuelle de la pluie efficace totale, période (1992-2021)

3.2. A l'échelle saisonnière

La pluie efficace reçue par la culture de l'orge est illustrée par la figure 20. Le graphe nous a permis à déterminer que la moyenne de la pluie efficace de l'orge est de 257,74 mm.

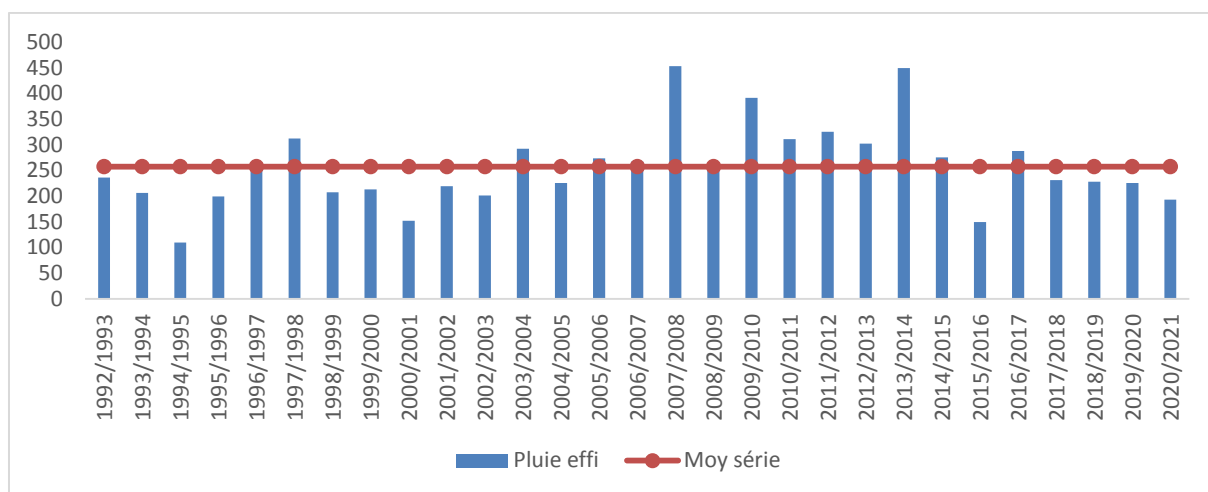


Figure 20. Variation interannuelle de la pluie efficace à l'échelle saisonnière, période (1992-2021)

4. Calcul des besoins en eau de la culture de l'orge (ETc)

Les besoins en eau de la culture de l'orge calculés par le modèle CropWat sont présentés par la figure 21. Il est constaté que la valeur moyenne de l'ETc de l'orge est de l'ordre de 376,8 mm. Cette valeur se situe dans la fourchette établie par la FAO, qui varie entre 350 à 550 mm selon le climat.

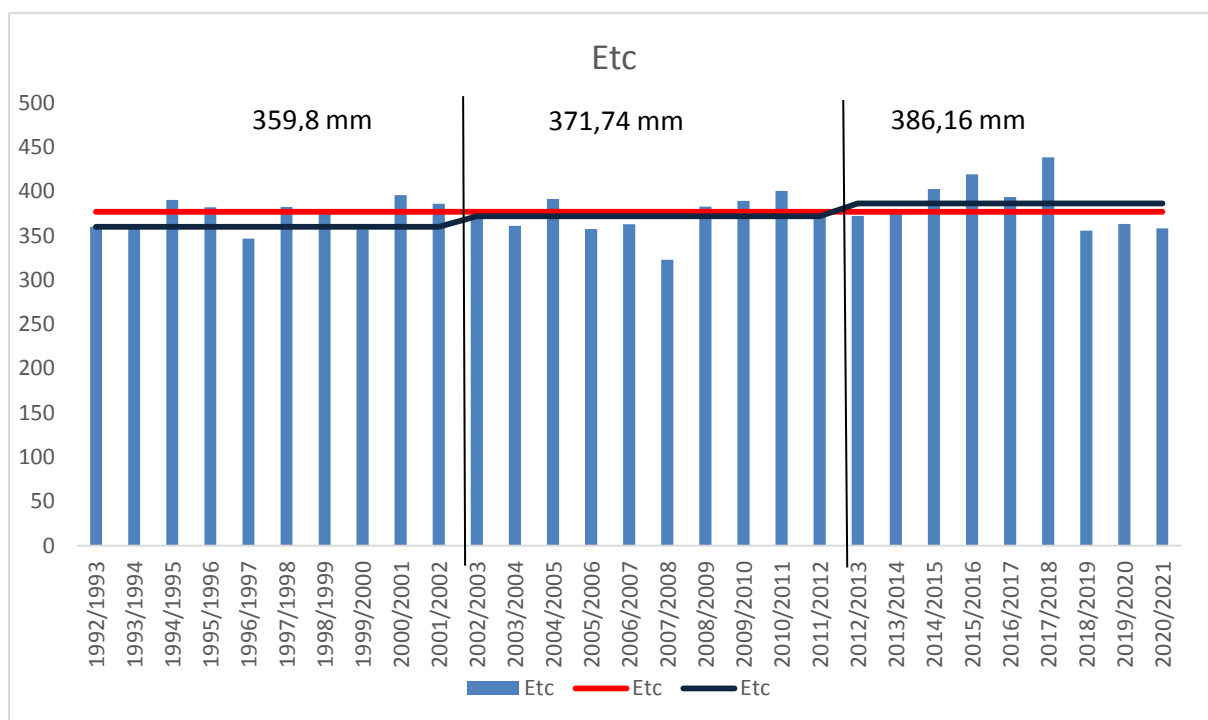


Figure 21. Variation interannuelle du besoin en eau de l'orge (ETc) estimé par le modèle CropWat.

5. Calcul du besoin en eau d'irrigation (BEI)

Les besoins en eau d'irrigation représentent la quantité d'eau nécessaire à ajouter aux précipitations pour une production agricole optimale. La figure 22 montre les valeurs de BEI estimés par le CropWat, il est déterminé que la moyenne interannuelle de la période (1992-2021) est de l'ordre de 205,12 mm, varie entre un minimum de 68,2 mm et un maximum de 293,2 mm.

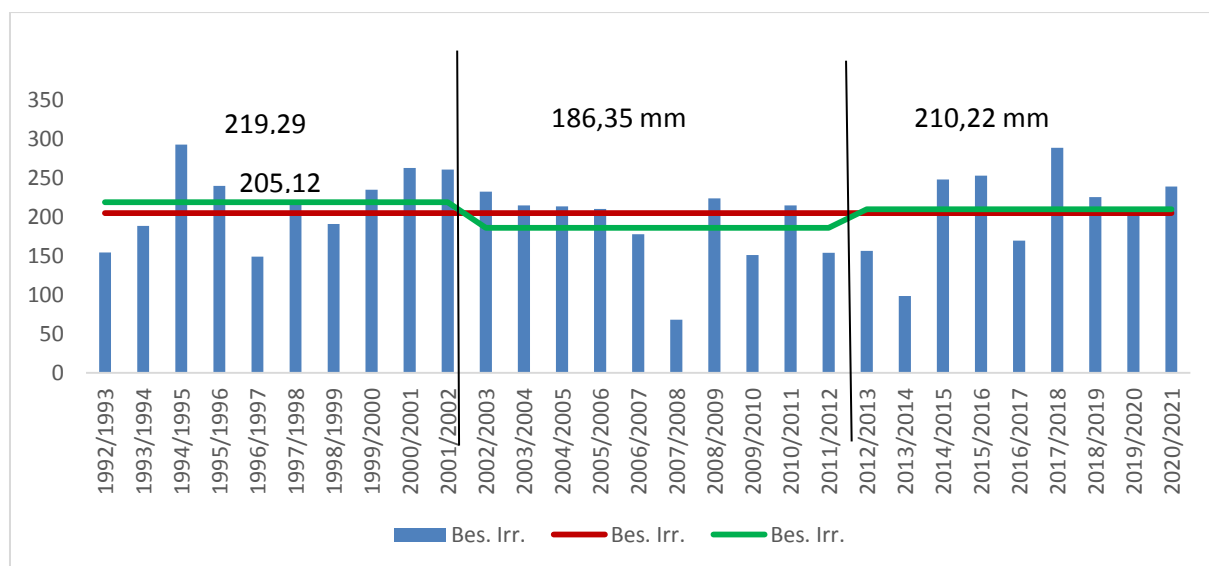
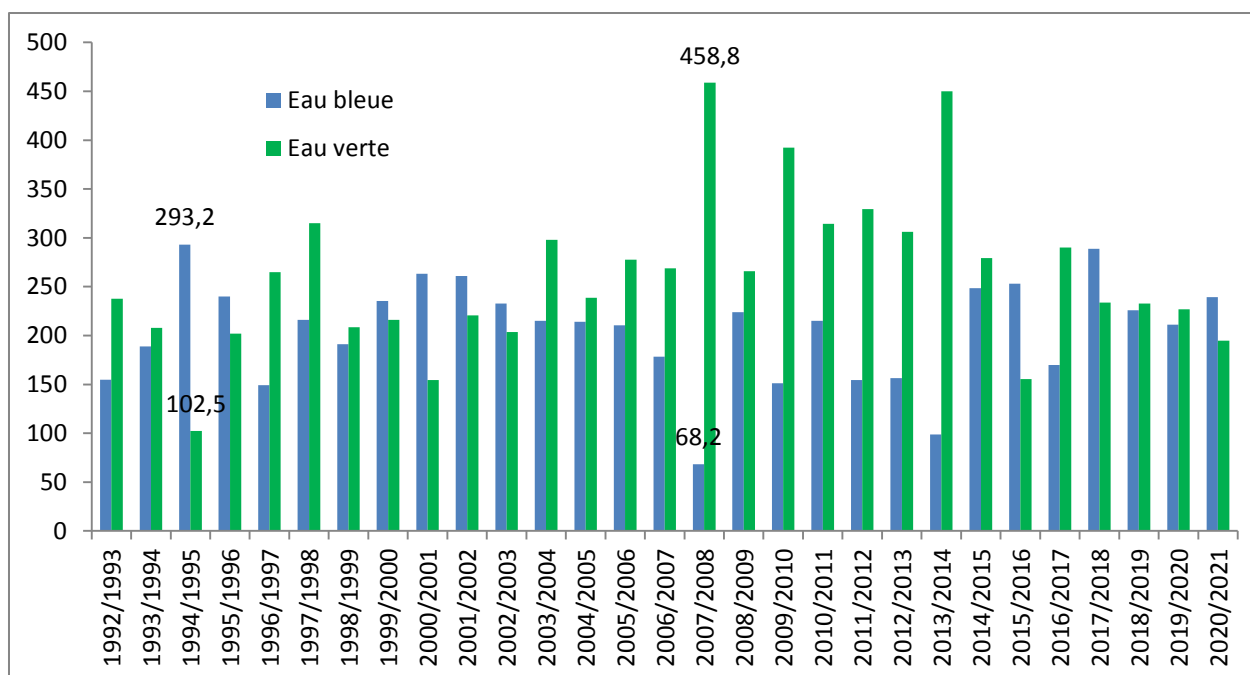


Figure 22. Variation interannuelle du besoin en eau d'irrigation (BEI) de l'orge estimé par le modèle CropWat.

6. Eau bleue et l'eau verte

Pour un produit agricole l'eau virtuelle représente l'eau évapotranspirée par les cultures. Elle se présente sous deux formes «l'eau verte» provenant des précipitations et trouvée naturellement dans le sol et «l'eau bleue» ou eau d'irrigation (Hoekstra et al, 2005; Siebert et al, 2010). La figure numéro 23 montre la variation interannuelle de la quantité d'eau bleue et verte, il est constaté que l'eau verte est un maximum de 458,8 (2007/2008) mm et minimum de 102,5 mm (1994/1995), par contre l'eau bleue varie entre un minimum de 68,2 mm (2007/2008) et un maximum de 293,2 mm.



La figure 23. La variation interannuelle de la quantité d'eau bleue et verte (1992/2021)

7. Productivité de l'eau de l'orge

La figure 24 montre la variation interannuelle de la productivité de l'eau de l'orge, il est constaté que la productivité de l'eau moyenne sur la période (2000-2020) est de l'ordre de 326,18 litres, varie entre un minimum de 208,61 litres (2002/2003) et un maximum de 590,59 litres (2013/2014).

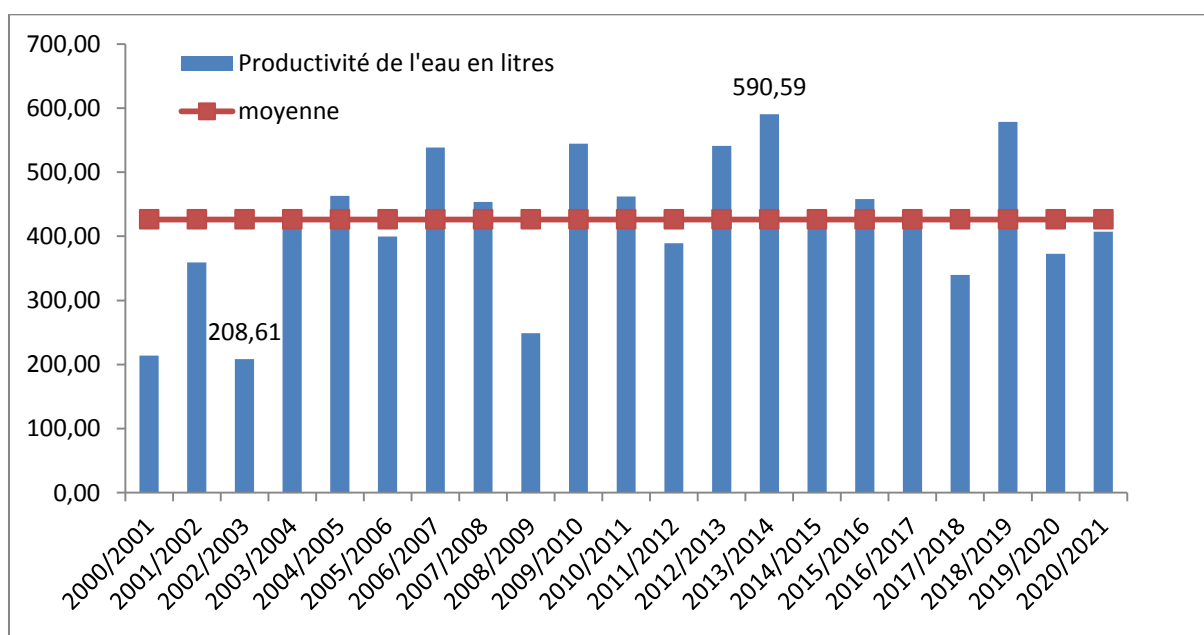


Figure 24. Variation interannuelle de la productivité de l'eau de l'orge (2000-2020)

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'équation FAO-Penman-Montieth est recommandée comme méthode standard pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence et des cultures ainsi que de l'eau d'irrigation par le biais des modèles CropWat de la FAO. L'évapotranspiration moyenne annuelle de référence (ET_o) pour la région de Tiaret a été estimée à 997,87 mm. Celle correspondante à la saison de culture en question est de l'ordre de 399,88 mm.

Pour l'ensemble du cycle de développement de la culture de l'orge, les besoins en eau d'irrigation (BEI) ont atteint 293,20 mm. Par contre les besoins en eau de ces cultures (ET_c), sont de l'ordre de 438,20 mm. Les valeurs moyennes de ces paramètres, ET_c et BEI, fluctuent tout au long du cycle de développement de cette culture en fonction des conditions météorologiques et des sols.

Les résultats sur l'ET_c et BEI ont fourni une évaluation pratique pour la programmation de l'irrigation dans les milieux semi-arides et arides.

Ces résultats peuvent être utilisés pour une utilisation plus efficace de l'eau et pour optimiser la production de l'orge dans les régions arides et semi arides.

La Compréhension des ET_c, des IWR et de la planification de l'irrigation pendant les mois de pénurie aident les agriculteurs à prendre la bonne décision pour éviter toute réduction de rendement dans leur exploitation.

Bien que les modèles CropWat fournisse des estimations raisonnables dz l'ET_c et BEI, pour plus des résultats fiables ; il doit être validé dans le contexte de la zone d'étude.

Enfin, dans le contexte actuel de rareté de la ressource en eau, les agriculteurs doivent être encouragés d'avantage à rationaliser l'utilisation de l'eau, à valoriser celle dont ils disposent, et aux gestionnaires d'assurer une distribution équitable de la ressource en fonction des besoins des cultures, tout en répondant aux contraintes de la maintenance, garante de la pérennité des aménagements , tout cela pour assurer une agriculture plus productive et durable.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Allan J.A., 1998. Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits. *Ground Water* 36(4): 545–546.
- Amri A., Ouammou L., Nassif F. 2005: Barley-based Food in Southern Morocco: In: Grando S. and Gormez Macpherson H. (eds.). 2005: Food Barley: Importance, Uses and Local Knowledge. Proceedings of the International Workshop on Food Barley Improvement, 14-17 January 2002, Hammamet, Tunisia. ICARDA, Aleppo, Syria. 22-28.
- Andich K. et Alaoui S.B., 2003. Elaboration d'un référentiel d'aide à la décision pour les céréales d'automne, DALIL EL FALAH, version 1,0.
- Belaid D. 1996. Aspect de la céréaliculture algérienne. Office des Publications Universitaires, Alger 207-217p.
- Benbelkacem A. 2013: Rapport national des activités du projet INRAA-ICARDA 2012-2013. 45p.
- Boufenar, Zaghouan F, Zaghouan O. (2006).Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (blé dur, blé tendre, orge et avoine).ITGC d'Alger. 1ère Ed .P 14-121.
- Brown S., Schreier and L.M. Lavkulich, 2009. Incorporating Virtual Water into Water Management: A British Columbia Example. *Water Resources Management* 23(13): 2681-2696.
- Camille M., 1980 : Céréales .Phytotechnie spéciale bases scientifiques et techniques de la production des principales espèces de grande culture en France. Maison rustique,PARIS ,1980. 318p.
- Ceccarelli S., Grando S., Maatougui M., Michael M., Slash M., Haghparast R., Rahmanian M., Taheri A., Al-Yassin A., Benbelkacem A., Labdi M., Mimoun H., Nachit M. 2010 : Plant breeding and climate changes. *J. Agric. Sci., Cambridge*, 148: 627-637
- Chadefaud, M., L. Emberger. 1960. *Traité de Botanique Systématique*. Editeur Masson et Cie, Paris. 2: 1220-1223.
- Duvignaud P., 1992. Aménagement et gestion du territoire. Application en Algérie (région de Tiaret et Alger). Univ de Nice-Sophia Antipolis. Pp 43-46.
- Falkenmark M. and J. Roeckstrom, 2006. The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management, *Journal of Water Resources Management*, 132(2), pp. 129-132.
- Feldman M., 1976 - Taxonomic classification and names of wild, primitive, cultivated, and modern cultivated wheat. In: Simmonds N.W. ed., *Evolution of crop plants*. Longman, London, 120-128.

Références bibliographiques

- Gonde, R. et Jussiaux, M. 1980. Cours d'agriculture moderne. 9ème édition, Ed. Maison Rustique, Paris, 628 p.
- Grando S., Macpherson H. G. 2006: Food Barley: Importance, uses and local knowledge. In proceedings of the International Workshop on Food Barley Improvement, 14-17 January 2002, Hammamet, Tunisia, 156 pp.
- Hariri A, 2003. Etude et modélisation de la trempe en malterie, thèse I.N.P.L., spécialité : biotechnologie et industries alimentaires, Nancy (France).
- Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q., 2005. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*, 15, 45-56.
- Jiang W., and R. Marggraf, 2015. Bilateral virtual water trade in agricultural products: a case study of Germany and China, *Water International*. 40(3): 483-498.
- Kumar, M., and O. Singh, 2005. Virtual water in global food and water policy making: Is there a need for rethinking? *Water Resources Management*, 19(6):759-789.
- M., Taheri A., Al-Yassin A., Benbelkacem A., Labdi M., Mimoun H., Nachit M. 2010 : Plant M., Taheri A., Al-Yassin A., Benbelkacem A., Labdi M., Mimoun H., Nachit M. 2010 Plant breeding and climate changes. *J. Agric. Sci., Cambridge*, 148: 627-637
- Ma, J., A.Y. Hoekstra, H. Wang, A.K. Chapagain, and D. Wang, 2006. Virtual versus real water transfers within China. *Philosophical Transactions of the Royal Society .B*. 361: 835-842.
- Metselaar, K., 1999. Auditing predictive models: a case study in crop growth. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, the Netherlands.
- Sanchez-Monge R., Gomez L., Barber D., Lopez-Otin C., Armentia A., Salcedo G. 1992: Wheat and barley allergens associated with baker's asthma. Glycosylated subunits of the alpha amylase inhibitor family have enhanced IgE-binding capacity. *Biochem. J.*, 281: 401-405.
- Siebert S., Burke, J., Faures, J.M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., Portmann, F.T. 2010. Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1863–1880.
- Soltner D., 2005. Les grandes productions végétales. 20ème Edition. Collection science et techniques agricole, 472p,
- Soltner D., 2005. Les grandes productions végétales. Céréales. Collection sciences et techniques agricoles. 20è édition. Paris. France, pp 21-55
- Souillah N., 2008 : Diversité de 1γ génotypes d'orge (*Hordeum .vulgare* L) et de 13 génotypes de blé tendre : étude des caractères de production et d'adaptation. Thèse Magister, université de Constantine, 165p.

Références bibliographiques

- Verma S, 2007. Can H-O work for H₂O? Inter-state virtual water trade as an alternative to inter basin water transfers in India. M.Sc. Thesis, UNESCO-IHE, Institute for Water Education, Delft, the Netherlands.
- Verma S., D. A. Kampman, P. van der Zaag, and A. Y. Hoekstra, 2007. Going against the flow: A critical analysis of virtual water trade in the context of India's National River Linking Program, *Physics and Chemistry of the Earth*, doi:10.1016/j.pce.2008.05.002
- Zairi M., 2015. Caractérisation de la production de quelques lignées d'orge issues de la première sélection participative en Algérie. Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes, soutenu le 15/12/2015, 171 p.
- Zella L., 2017. L'eau pénurie ou incurie. Office des œuvres universitaires, Blida 294 p.
- Zella L., 2019. Irrigation eau, sol et plante. Office des œuvres universitaires, 388 p.
- Zella L., and Smadhi D., 2020. Virtual cereal water in algeria: blessing or curse? Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°43, Sept 2020, pp. 41-55.