

RUPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifiques
Université Saad Dahleb Blida
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Biotechnologies



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de master

Filière : Science de la nature et de la vie

Domaine : Sciences Agronomique

Option : Eau et Environnement

Thème

**PILOTAGE D'IRRIGATION PAR LE MODELE AQUACROP ET
CROPWAT : CAS DE LA POMME DE TERRE ET DE LA TOMATE**

Présenté par : Hamdaoui Sabrina

Jury :

Président : L. Zella (USDB)

Promoteur: M. Amirouche (ENSA)

Examineur: H. Deghaichia (USDB)

Examineur: N. Degui (USDB)

Année Universitaire : 2019/2020

RESUME

En Algérie, les cultures maraichères sont tributaires de l'irrigation. Dans ce contexte, la présente étude est orientée vers la gestion efficace de l'eau d'irrigation qui contribue à la croissance et l'amélioration des rendements. La démarche repose sur le calcul des besoins en eau d'irrigations des cultures en questions afin de maîtriser l'efficacité des apports d'eau en relation avec les besoins en eau des cultures. Cette efficacité d'utilisation, est impérative pour une meilleure production végétale et pour la préservation de l'environnement agricole. Dans cette étude, nous avons utilisé deux modèles agronomiques CropWat (v8.0) et AquaCrop (v6.1), qui ont été élaborés par la FAO, pour estimer les besoins en eau d'irrigation (BEI), les besoins en eau (ETc) de la culture de tomate et de la pomme de terre, et l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE), dans un climat semi-aride (Wilaya de Tiaret) sur une période de 28 ans (1990-2017). Les résultats obtenus ont montré qu'il existe une relation très étroite entre les estimations produites par les deux modèles CropWat et AquaCrop. Ces estimations concernent le BEI, ETc et l'EUE, qui sont respectivement de l'ordre de 349,22 mm, 415, 85 mm, 7,24 kg/m³ et 351.82 mm, 418 mm ; 7,47 kg/m³ pour la tomate et de 240.56 mm, 369.8 mm, 11.64 kg/m³ et 245.64 mm ; 373.82, 11.40 kg/m³ pour la pomme de terre. 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 : AquaCrop, CropWat, Tomate, Pomme de terre, Efficacité d'utilisation de l'eau, irrigation.

ABSTARCT

In Algeria, market gardening depends on irrigation. In this context, the present study is oriented towards the efficient management of irrigation water that contributes to growth and yield improvement. The approach is based on the calculation of irrigation water requirements of the crops in question in order to control the efficiency of water supply in relation to crop water requirements. This efficiency of use is imperative for a better crop production and for the preservation of the agricultural environment. In this study, we used two agronomic models CropWat (v8.0) and AquaCrop (v6.1), which were developed by FAO, to estimate irrigation water requirements (IWR), Crop water requirements (CWR) of tomato and potato crops, and water use efficiency (WUE), in a semi-arid climate (Wilaya of Tiaret) over a period of 28 years

(1990-2017). The results obtained showed that there is a very close relationship between the estimates produced by the two models CropWat and AquaCrop. These estimates concern the EIB, ETc and EUE, which are respectively of the order of 349.22 mm, 415, 85 mm, 7.24 kg/m³ and 351.82 mm, 418 mm; 7.47 kg/m³ for tomato and 240.56 mm, 369.8 mm, 11.64 kg/m³ and 245.64 mm; 373.82, 11.40 kg/m³ for potato. Crop growth simulation models have become important tools for evaluating and developing deficit irrigation strategies, especially in arid and semi-arid regions.

Keywords: AquaCrop, CropWat, Tomato, Potato, Water use efficiency, irrigation.

ملخص

في الجزائر ، تعتمد زراعة الحدائق على الري. في هذا السياق ، فإن الدراسة الحالية موجهة نحو الإدارة الفعالة لمياه الري التي تساهم في النمو وتحسين الغلات. يعتمد النهج على حساب احتياجات مياه الري للمحاصيل المعنية من أجل التحكم في كفاءة إمدادات المياه فيما يتعلق باحتياجات المحاصيل المائية. هذه الكفاءة في الاستخدام ضرورية لتحسين إنتاج المحاصيل وللحفاظ على البيئة الزراعية. في هذه الدراسة، استخدمنا نموذجين زراعيين (CropWat (v8.0) و AquaCrop (v6.1) ، تم تطويرهما بواسطة منظمة الأغذية والزراعة لتقدير متطلبات مياه الري (EIB) ، والاحتياجات المائية (ETc) (زراعة الطماطم والبطاطس ، وكفاءة استخدام المياه (EUE) ، في مناخ شبه جاف (ولاية تيارت) على مدار 28 عامًا (1990-2017). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن هناك علاقة وثيقة للغاية بين التقديرات المنتجة من قبل النموذجين CropWat و AquaCrop تتعلق هذه التقديرات بـ BEI و ETc والاتحاد الأوروبي، والتي هي على التوالي بأمر 349.22 ملم ، 415.85 ملم ، 7.24 كجم / م³ و 351.82 ملم ، 418 ملم ؛ 7.47 كغ / م³ للبطاطس و 240.56 ملم و 369.8 ملم و 11.64 كجم / م³ و 245.64 ملم ؛ 373.82 ، 11.40 كغ / م³ للبطاطس. أصبحت نماذج محاكاة نمو المحاصيل أدوات مهمة لتقييم وتطوير استراتيجيات الري الناقصة ، خاصة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة.

الكلمات المفتاحية: AquaCrop، CropWat، طماطم، بطاطس، كفاءة استخدام المياه ، الري.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon père, pour son appui et son encouragement celui qui m'a guidé vers la voix de réussite.

A ma mère, la source de mes joies, pour son amour son soutien sa tendresse

A mes chers frère : Hicham ,Billel ,Housseem

A mes chers sœur : Amira ,Aya ,kawther ,Amina

A mes chers Amies : Adel et Sabrina

A toute mes collègues de la promotion Eau et Environnement 2019-2020

A toute les personnes que je connais et que je n'ai pas citées ceux que j'aime et m'aiment.

WALID

Remerciement

Je remercie en premier lieu Dieu le tout puissant de m'avoir accordé la puissance et la volonté pour terminer ce travail.

Je tiens vivement à exprimer ma profonde reconnaissance et gratitude à mon encadreur **Dr Amirouche M** ; qui a bien voulu, par son aimable bienveillance, à diriger cette étude, qui a fait preuve d'une grande patience. Ses conseils, ses orientations ainsi que, ses qualités humaines et ses intérêts portés pour mon sujet de recherche m'ont permis de mener à terme ce projet. Son encadrement était des plus exemplaires.

Mes remerciements vont aussi à **Mr Zella L**, Professeur et chef d'option eau et environnement, d'avoir eu l'amabilité d'accepter volontairement et aimablement de présider le jury.

Je tiens aussi à remercier les membres de jury : **Madame Degui** et Monsieur **Daghaichia H**, pour avoir bien voulu me faire honneur d'examiner mon mémoire.

En fin, j'adresse ma profonde gratitude à ma famille surtout **ma mère** qui m'a toujours soutenue et qui est contribué à ma formation au niveau de tous les cycles d'études.

Et mes remerciements à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Merci à tous et à Toutes.

Sommaire

Résumé.....	I
Dédicace.....	III
Remerciement.....	IV
Sommaire.....	V
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux.....	XI
Liste des abréviations.....	XII
Introduction générale.....	1

Partie 1 : Synthèse bibliographique

Chapitre 01. Les cultures (Tomate et pomme de terre).....	3
I. Données générales sur la culture de pomme de terre.....	3
1. Origine et historique.....	3
2. Classification botanique	3
3. Description générale de la plante.....	4
4. Cycle de développement	4
4.1. La germination.....	4
4.2. La croissance végétative.....	4
4.3. La tubérisation.....	4
4.4. Le repos végétatif.....	4
5. Exigences culturales.....	5
5.1. Exigences pédoclimatiques de la culture.....	5
5.1.1. Température et lumière.....	5
5.1.2. Eau et humidité.....	6
5.1.3. Sol.....	6
6. Exigences en fertilisants.....	6
7. Situation et importance économique.....	6
7.1. Dans le monde.....	6
7.2. En Algérie.....	7
7.3. Zones de production et types de culture pratiqués en Algérie.....	8
8. Problèmes phytosanitaires de la culture.....	8

II. Données générales sur la culture de tomate.....	9
1. Origine et historique.....	9
2. Classification et description botanique	9
3. Cycle de développement.....	10
3.1. La germination.....	10
3.2. La croissance végétative	11
3.3. La floraison.....	11
3.4. Pollinisation	11
3.5. Fructification et nouaison des fleurs.....	11
3.6. Maturation des fruits.....	11
4. Exigences culturelles	12
4.1. Exigences pédoclimatiques.....	12
4.1.1. Température et lumière.....	12
4.1.2. Eau et humidité.....	13
4.1.3. Sol	13
4.1.4. Le PH.....	13
4.1.5. La salinité	13
4.2 Exigences en fertilisants.....	14
5. Situation et importance économique	14
5.1. Dans le monde	14
5.2 En Algérie	14
Chapitre 02. Pilotage d'irrigation.....	15
1. Détermination des besoins en eau des cultures.....	15
1.1 Pourquoi déterminer les besoins en eau des cultures ?.....	15
1.1.1. Projet d'irrigation	15
1.1.2. Gestion des réseaux d'irrigation.....	16
1.1.3. Planification de l'utilisation des ressources hydrauliques	16
1.2. Comment déterminer les besoins en eau des cultures ?.....	16
1.2.1. Besoin en eau d'irrigation.....	16
1.2.2. Besoin en eau de culture (ETM).....	16
1.2.3. Evapotranspiration.....	16

1.2.3.1. Les différents concepts de l'évapotranspiration	17
1.2.4. Choix du coefficient cultural	18
1.2.5. Les modèles d'ETP récentes dans la littérature.....	20
2. Outils de pilotage de l'irrigation	21
2.1. Mesure de l'état hydrique du sol.....	21
2.1.1. Mesure du potentiel hydrique par des sondes tensiométriques.....	21
1.1.2. Tensiomètre à eau.....	21
1.1.3. Capteurs à matrice granulaire/ Watermark	21
1.1.4. Bloc de gypse.....	21
1.2. Mesure de la teneur en eau du sol.....	22
1.2.1. Sondes capacitives.....	22
1.2.2. Humidimètre TDR (time domain reflectometry).....	22
1.2.3. Humidimètre à neutrons.....	22
1.2.4. Radar sous-terrain.....	22
1.3. Mesure de l'état hydrique des plantes	22
1.3.1. Epaisseur de la feuille.....	23
1.3.2. Diamètre de la tige.....	23
1.3.3. Flux de sève.....	23
2. L'opération de pilotage d'irrigation	23
2.1. Choix de la date d'irrigation	23
2.2. Choix de la dose et de la fréquence d'irrigation.....	23
2.3. Choix de mode d'irrigation.....	23
2.4. Modélisation.....	24
Chapitre 3. Modélisation agronomique.....	25
1. Modèles de culture.....	25
1.1. Définition et historique.....	25
2. Etapes de l'élaboration du modèle.....	26
2.1. Caractérisations.....	26
2.2. L'identification.....	26
2.3. La vérification.....	26
2.3. L'exploitation	26

3. Concept de base en modélisation.....	26
3.1. Système.....	27
3.2. Modèle.....	27
3.3. Paramètres.....	27
3.4. Modules.....	27
4. Typologie des modèles de cultures.....	27
4.1. Les modèles mécanistes.....	28
4.2. Les modèles empiriques.....	28
5. Description des modèle AquaCrop et CropWat.....	28
5.1. Le modèle AquaCrop.....	28
5.2. Le modèle CropWat.....	30
5.3. Les données d'entrées.....	31
5.4. Données de sortie.....	32

Partie 2 : Matériels et méthodes

Introduction.....	33
I. Présentation de la zone d'étude.....	33
1. Situation géographique de la zone d'étude.....	33
2. caractéristique physique.....	34
2.1 Relief.....	34
2.2. Géologie.....	34
2.3. Hydrogéologie.....	35
2.3.1. Les eaux superficielles.....	35
2.3.2. Les eaux souterraines.....	35
2.4. Types de sol.....	35
2.4.1. Occupation du sol.....	36
2.5. Climatologie.....	36
II. Evaluation des besoins en eau des cultures par AquaCrop et CropWat.....	37
1. Les données climatiques.....	37
2. Les données liées à la culture.....	37
2.1. AquaCrop.....	38
2.2. CropWat.....	38

3. Les données liées au sol.....	39
4. Calcul l'évapotranspiration potentielle.....	39
5. Calcul la pluie efficace.....	40
6. Calcul les besoins en eau des cultures.....	40
7. Etablir des calendriers d'irrigation	41
8. Calcul l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE).....	41

Partie 3 : Résultats et discussions

1. Analyse des paramètres climatiques.....	42
1.1. Pluie.....	42
1.2. Température.....	42
1.3. Humidité de l'air.....	43
1.4. Vitesse du vent.....	44
1.5. Insolation.....	44
2. Calcul de l'évapotranspiration de référence.....	45
2.1. A l'échelle de l'année.....	45
2.2. A l'échelle de la saison de culture.....	45
3. Calcul de la pluie efficace.....	46
3.1. A l'échelle annuelle	46
3.2. A l'échelle saisonnière.....	47
4. Calcul les besoin en eau de la culture.....	48
4.1 Tomate.....	48
4.2. Pomme de terre.....	48
5. Calcul les besoin en eau d'irrigation.....	49
5.1. Tomate.....	49
5.2. Pomme de terre.....	50
6. Calcul l'efficacité d'utilisation de l'eau.....	50
6.1. Tomate.....	50
6.2. Pomme de terre.....	51
Conclusion générale	

Liste des figures

Figure 01. Cycle de croissance de la pomme de terre.....	5
Figure 02. Cycle de croissance de la tomate.....	12
Figure 03. Schéma théorique de la variabilité annuelle de l'ET ₀ , ET _M et ET _R	18
Figure 04. Courbe de coefficients culturaux et définition des phases.....	19
Figure 05. Interface du modèle AquaCrop.....	29
Figure 06. Fenêtre principale du logiciel CropWat.....	30
Figure 07. Situation géographique de la wilaya de Tiaret.....	33
Figure 08. Distribution des classes des sols dominants dans la wilaya de Tiaret.....	36
Figure 09. Paramètres liés au sol d'AquaCrop.....	38
Figure 10. Données d'entrées liées au sol.....	39
Figure 11. Variabilité interannuelle de la pluie (1990-2018).....	42
Figure 12. Températures moyennes mensuelles (1990-2017).....	43
Figure 13. Humidités relatives moyennes mensuelles (1990-2017).....	43
Figure 14. Vitesse du vent moyenne mensuelle pour la période d'étude (1990-2017).....	44
Figure 15. Variation de la durée d'ensoleillement pour la période 1990-2017.....	44
Figure 16. Variation interannuelle de l'évapotranspiration de référence, période (1990-2017).....	45
Figure 17. Variation interannuelle de l'évapotranspiration de référence à l'échelle de la saison de culture, période (1990-2017).....	46
Figure 18. Variation interannuelle de la pluie efficace totale, période (1990-2017).....	47
Figure 19. Variation interannuelle de la pluie efficace à l'échelle saisonnière, période (1990-2017).....	47
Figure 20. Variation interannuelle du besoin en eau de la tomate (ET _c) estimé par le modèle CropWat et AquaCrop.....	48
Figure 21. Variation interannuelle du besoin en eau de la pomme de terre (ET _c) estimé par le modèle CropWat et AquaCrop.....	49
Figure 22. Variation interannuelle du besoin en eau d'irrigation (BEI) de la tomate estimé par le modèle CropWat et AquaCrop.....	49
Figure 23. Variation interannuelle du besoin en eau d'irrigation (BEI) de la pomme de terre estimé par le modèle CropWat et AquaCrop.....	50

Figure 24. Efficience d'utilisation de l'eau pour la culture de la tomate estimée par le modèle CropWat et AquaCrop.....51

Figure 25. Efficience d'utilisation de l'eau pour la culture de la pomme de terre estimée par le modèle CropWat et AquaCrop.....52

Liste des tableaux

Tableau 01. Taxonomie de la pomme de terre (Hawkes, 1990).....	3
Tableau 02. Evolution de la consommation de la pomme de terre en Algérie.....	8
Tableau 03. La classification systématique de lycoperiscum esculentum.....	9
Tableau 04. Description des différentes parties d'un plant de tomate.....	10
Tableau 05. Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate.....	13
Tableau 06. Zones de production de tomate en Algérie.....	14
Tableau 07. Modèles d'ETP recensés dans la littérature.....	20
Tableau 08. Les données d'entrée des modèles AquaCrop et CropWat.....	31
Tableau 09. Les données de sorties des modèles AquaCrop et CropWat.....	32
Tableau 10. Paramètres d'entrés exigés par le modèle AquaCrop.....	38

Liste des abréviations

ET0 : évapotranspiration de référence

ETP : évapotranspiration potentielle

ETc : besoin en eau des cultures

ETM: Besoin en eau de culture

EUE : d'efficience d'utilisation de l'eau

Kc: Coefficient cultural

Tr: transpiration

Ev: évaporation

FAO: Food and Agriculture Organization

°C: Degré Celsius

cm : Centimètre

g: Gramme

ha: Hectare

Kg: Kilogramme

l: Litre

ml: Millilitre

mm: Millimètre

h : heure

s : seconde

Introduction générale

La raréfaction des ressources en eau et l'augmentation croissante de leur demande globale, particulièrement dans le secteur agricole qui détient 70 % de la consommation en eau dans le monde (FAO, 2011), nourrit le débat sur la problématique de l'amélioration de l'efficacité d'utilisation et de la productivité de l'eau (van Halsema et al., 2012). Les acteurs du secteur de l'irrigation, notamment les décideurs et les irrigants, ont besoin d'indicateurs sur l'efficacité de l'irrigation et la productivité de l'eau afin de mettre en place des stratégies appropriées de gestion durable des ressources en eau.

L'agriculture nécessite une grande quantité d'eau et, à l'avenir, la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation augmentera considérablement en raison de la demande croissante alimentaire.

La meilleure pratique en matière d'agriculture, définie comme l'agriculture qui optimise l'utilisation de l'eau, est une clé pour surmonter ce problème en améliorant l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE).

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, une utilisation plus efficace de l'eau dans l'agriculture doit être la priorité absolue. Il est estimé que dans les régions semi-arides et arides, l'eau demeure une contrainte majeure pour l'amélioration de la production agricole. Aussi, la maximisation du rendement par unité d'eau (efficacité de l'eau de pluie et/ou irrigation) semble être la meilleure stratégie. En dépit de la rareté de l'eau, le constat fait sur la gestion de l'eau d'irrigation fait ressortir une insuffisance relative aux méthodes de gestion de l'eau simples et accessibles aux agriculteurs pour guider la programmation des irrigations. En effet, devant l'absence totale d'outils d'aide à la décision (outils de pilotage et bulletins d'avertissement à l'irrigation) maîtrisés par les agriculteurs. Le déclenchement et les doses d'irrigation sont, en général, décidés sur la base de l'observation visuelle. Pour cela, il est important que les besoins en eau des cultures soient connus à différents niveaux de gestion dans ces régions pour accomplir une gestion efficace de l'irrigation. Les besoins en eau des cultures sont satisfaits grâce aux précipitations efficaces, à l'eau d'irrigation appliquée et à l'humidité disponible du sol.

Le recours à la modélisation est l'un des moyens les plus récents pour le calcul des bilans hydriques, ainsi que l'évaluation des besoins en eau des cultures. Pour cela, il est intéressant de confronter les données collectées lors d'expériences réalisées sur le champ, aux résultats de modèles choisies afin de mieux comprendre les processus étudiés.

La présente étude s'inscrit dans cette optique qui vise à déterminer les besoins en eau de la culture de la pomme de terre et de la tomate dans une région semi-aride, en utilisant les modèles *AquaCrop* et *CropWat*.

Ce document est structuré en trois parties :

- La première partie abordera dans un premier temps les caractéristiques des cultures 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 les modèles de cultures (*AquaCrop* et *CropWat*) qui ont été choisis comme des outils principaux à la modélisation.
- 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 thématique de recherche.
- Enfin, la troisième partie du document sera consacrée aux travaux de modélisation. Elle traite les résultats de simulations obtenus par les modèles *AquaCrop* et *Cropwat* et leurs discussions.

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

Synthèse bibliographique

Chapitre 01. Les cultures (Tomate et pomme de terre)

I. Données générales sur la culture de pomme de terre

1. Origine et historique

L'histoire de la pomme de terre a débuté il y a environ 8 000 ans près du lac Titicaca, à 3 800 mètres au-dessus du niveau de la mer, dans la cordillère des Andes, à la frontière entre la Bolivie et le Pérou. Des recherches ont révélé que des communautés de chasseurs et de cueilleurs arrivés dans le sud du continent américain depuis au moins 7 000 ans avaient commencé à domestiquer des espèces sauvages de pommes de terre qui poussaient en abondance autour du lac (FAO 2008).

En Algérie, la pomme de terre avait marqué son existence grâce aux colons français qui l'ont introduite vers 1856 (Amrar, 2008). En 1898, l'Algérie était déjà un pays exportateur de pomme de terre (Starostins, 1977). En effet, lorsque le pays a acquis son indépendance en 1962, il produisait 250 000 tonnes par an et en exportait environ le tiers (ONUAA, 2009).

2. Classification botanique

La pomme de terre connue sous le nom de *Solanum tuberosum*, et décrite par Linné en 1753, appartient à la famille des solanacées qui renferme des genres aussi variés que *Nicotiana* L., *Lycopersicon* Mill., *Capsicum* L... etc. (Tab. 01). *Solanum tuberosum* L. est une espèce tétraploïde ($2n = 4x = 48$), tout comme la plupart des espèces tubéreuses cultivées (Swiontek, 2003).

Tableau 01. Taxonomie de la pomme de terre (Hawkes, 1990)

Règne	Plantae
Sous règne	Trachéobionta
S/Embranchement	Phyta
Classe	Magnoliopsida
Sous classe	Asteridae
Ordre	Solanales
Famille	Solanaceae
Genre	<i>Solanum</i>
Espèce	<i>Solanum tuberosum</i> L.

3. Description générale de la plante

D'après Rousselle et al. (1996), la pomme de terre est une espèce herbacée, vivace par ses tubercules mais cultivée le plus souvent en culture annuelle.

L'appareil aérien est une touffe qui comprend un nombre plus ou moins élevé de tiges principales, donnant à la plante un port plus ou moins étalé (Roussignol et Rousselle Bourgeois, 1996).

Selon Polese (2006), le nombre de tiges varie de 2 à 10 par tubercule. Les fleurs sont autogames et sont diversement colorées selon les variétés. L'inflorescence est une cyme bipare et la fécondation croisée est quasi-inexistante. Les fruits sont des baies sphériques de 1 à 3 cm de diamètre.

L'appareil souterrain comprend un tubercule mère desséché et des tiges souterraines ou stolons sur lesquels vont se former les tubercules. Ces tubercules sont très riches en énergie nutritive, essentiellement constituée d'amidon (Polese, 2006).

4. Cycle de développement

Le cycle de développement de la pomme de terre dure trois à quatre mois, conditionné par des facteurs génétiques et environnementaux (Grenot, 2006). En partant d'un tubercule germé, le cycle de la pomme de terre comprend quatre phases (Soltner, 2005). Le cycle comprend six phases qui sont les suivantes :

4.1. La germination

Après une évolution physiologique interne peu connue, les tubercules deviennent capables d'émettre des bourgeons.

4.2. La croissance végétative

Elle correspond à la transformation des germes en tiges et feuilles, pendant laquelle les bourgeons axillaires donnent au-dessus du sol des rameaux et au-dessous des stolons.

4.3. La tubérisation

Elle correspond au stade de renflement des stolons pour former après une à deux semaines, une ébauche de tubercules qui grossissent jusqu'à la mort de la plante.

4.4. Le repos végétatif

Correspond à la phase où le tubercule est incapable de germer, même dans les conditions optimales de température et d'humidité. La durée de cette phase est variable selon les variétés, les conditions du milieu de production, et des conditions de stockage.

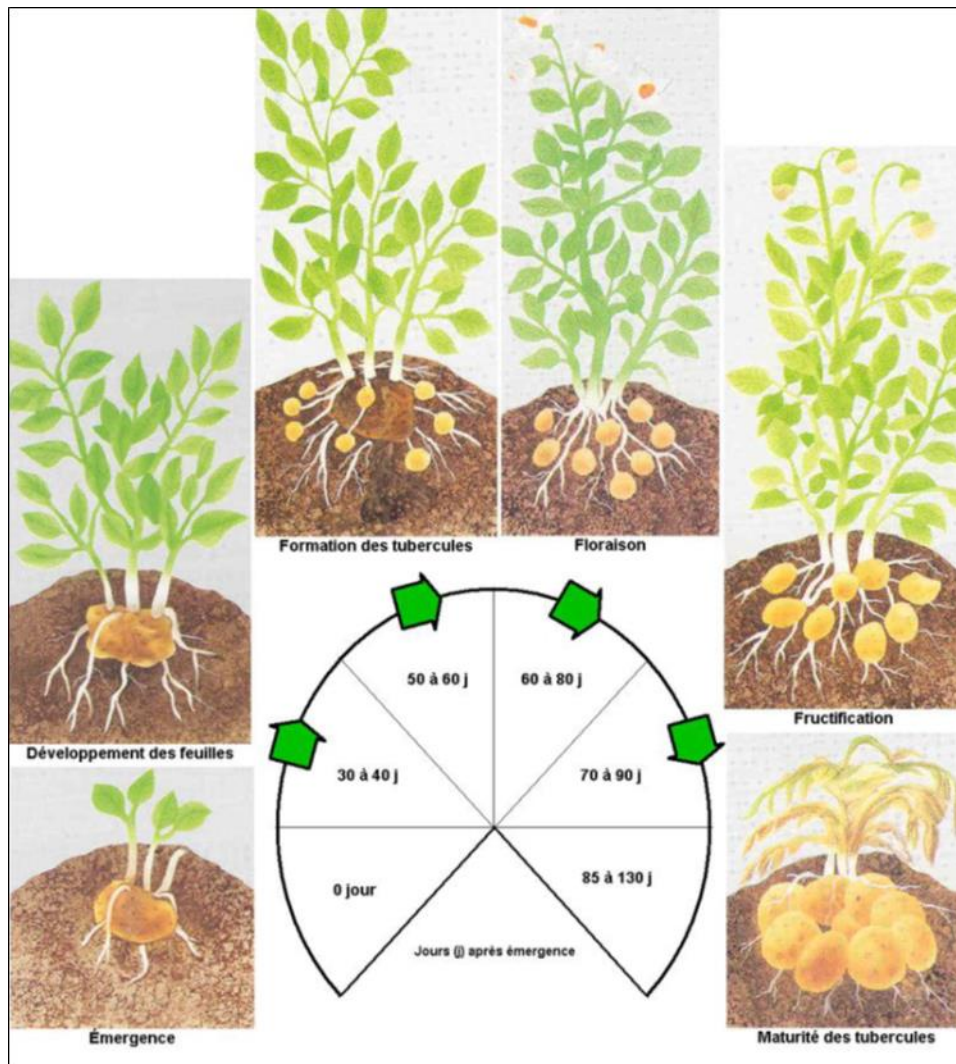


Figure 01. Cycle de croissance de la pomme de terre

Source: (Soltner, 2005).

5. Exigences culturales

5.1. Exigences pédoclimatiques de la culture

5.1.1. Température et lumière

Le zéro de végétation de cette plante se situe entre 6 et 7 °C, ce qui rend la plante très sensible au gel. La formation du tubercule est optimale lorsque la température est inférieure à 18°C et que les jours soit en courts (12 h). Au contraire, le développement de l'appareil végétatif est favorisé par des températures élevées (+25 °C) et des jours longs (14-18 h) (Reguieg, 2008). La pomme de terre peut être cultivée sur tout le territoire national et durant toute l'année, pourvu qu'il n'y ait pas de gelées (Mouhouche et Bazouche, 2008).

5.1.2. Eau et humidité

Le système racinaire de la pomme de terre étant peu profond, les rendements réagissent bien à une irrigation fréquente. Il convient de maintenir un niveau d'humidité du sol relativement élevé (Reguieg, 2008). Les besoins en eau de cette culture sont faibles au début de la végétation et très importants au moment de la croissance foliaire et la tubérisation (Khelifi et al., 2008). En effet, la pomme de terre est plus sensible au manque d'eau qu'à son excès (Mouhouche et Bazouche, 2008).

5.1.3. Sol

La plante n'est pas exigeante, tous les types de sol conviennent à cette culture, à condition qu'ils soient bien drainés et pas trop pierreux pour faciliter le grossissement des tubercules, mais elle se développe mieux dans les sols à texture grossière (Reguieg, 2008).

6. Exigences en fertilisants

En culture de la pomme de terre, les pratiques de fertilisation influent grandement sur le rendement et la qualité de la récolte (Deumier et al., 2004). La fertilisation azotée est considérée comme un facteur clé de maîtrise de la production de cette culture (Chambenoit et al., 2002).

Vue de la durée du cycle très court et la rapidité de croissance de la plante, la culture de pomme de terre exige la présence de trois types de fumure :

Fumure organique : un apport de 30 T/ha de fumier décomposé sera souhaitable.

Fumure de fond : azote de 20 à 30 unités /ha, P₂O₅ :150 unités/ha, K₂O :180- 200 unité/ha.

Fumure d'entretien : 100 unités/ha d'azote à apporter en trois fois par fractionnement (Reguieg, 2008).

Le fonctionnement et le mode d'épandage d'engrais dépendent de la forme d'engrais à utiliser et le type du sol (Khelifi et al., 2008).

7. Situation et importance économique

7.1. Dans le monde

Depuis les années 1990, la production de pomme de terre s'est intensifiée considérablement en Asie, Afrique et Amérique latine passant de moins de 80 millions de tonnes en 1990 à plus de 340 millions de tonnes en 2011.

En 2011, la Chine se place au premier rang des pays producteurs de pomme de terre avec une production de 88 350 220 tonnes suivie par l'Inde avec 42 339 400 tonnes et par la Fédération du Russie avec 32 681 470 tonnes (FAO, 2013).

Cette culture demeure une production importante des pays développés qui consomment environ 80% de la production mondiale (Dubois et Duvauchelle, 2007). Il faut noter aussi qu'il y a plus d'un milliard de personnes au monde qui la consomment quotidiennement (Mullins *et al.*, 2006).

Sur le plan économique, la pomme de terre est une source importante de nourriture, d'emploi et de revenus dans les pays en développement, où la production a plus que doublé au cours des quinze dernières années (FAO, 2008).

En effet, cette culture est devenue une importante denrée de base et une culture de rente pour des millions d'agriculteurs en Afrique, Asie et Amérique latine. La forte teneur énergétique et la facilité de production de la pomme de terre en font aussi un élément important de l'agriculture urbaine, qui offre des emplois et une sécurité alimentaire de quelque 800 millions de personnes (FAO, 2008).

La pomme de terre mérite une attention particulière parce qu'elle peut participer d'une manière très significative au développement des populations rurales et à la lutte contre la faim dans le monde entier (Bellahcen *et al.*, 2009).

7.2. En Algérie

En Algérie, la pomme de terre est considérée comme la deuxième culture vivrière après le blé (Nouani et Mekimene, 2008). Parmi toutes les espèces maraichères, c'est incontestablement la pomme de terre qui a connu la progression la plus forte et la plus régulière au sein des systèmes de culture en Algérie depuis l'indépendance (Chehat, 2008).

Dans le monde arabe, l'Algérie est le deuxième producteur de pomme de terre après l'Égypte et le quatrième en Afrique (ONUAA, 2009). Cette augmentation de la production est due essentiellement à la politique adoptée par l'État dans le cadre du Plan National de Développement Agricole (PNDA) (Kessaci, 2006).

Depuis le début des années 2000 jusqu'à 2008, cette culture porterait sur une superficie comprise entre 72 960 et 91 891 hectares, pour une production comprise entre 1,5 et 2 millions de tonnes par année. A partir de l'année 2009, on marque un accroissement de production qui atteint les 3,9 millions de tonnes en 2011 (FAO, 2013)

En termes de consommation, la pomme de terre a pris une part importante dans le régime alimentaire de l'algérien ces dernières années. On a noté une évolution sans cesse croissante passant de 20 kg/habitant/an en 1970, à plus de 100 kg en 2012 comme est indiqué dans le tableau 02 ci-après (MADR, 2013)

Tableau 02. Evolution de la consommation de la pomme de terre en Algérie (MADR, 2013)

Année	1970	1989	1995	2005	2012
Consommation par hab.an/kg	20	42	41	+65	102
Consommation (t)	273 647	1.000.700 1	1.200.000	2.156.550	+ 3.350.000

7.3. Zones de production et types de culture pratiqués en Algérie

Selon Chehat (2008), la pomme de terre est cultivée sur tout le territoire national, y compris les oasis du sud du pays, avec l'apparition récente du bassin spécifique d'El Oued.

On pourra distinguer trois bassins de production dans les zones du littoral et du sublittoral:

Région de l'Ouest: qui rassemble la wilaya de Tlemcen, Mostaganem et Chlef;

Région du Centre: regroupant la wilaya d'Ain Defla, Tipaza, Alger, Boumerdes, Bouira et Tizi-Ouzou;

Région de l'Est: représentée par la wilaya de Skikda sur le littoral et de Guelma, Sétif, Mila et Batna à l'intérieur.

Regueig (2008) rapporte qu'il y a pratiquement trois types de culture en Algérie selon les régions:

a. La culture de primeur: pratiquée surtout sur le littoral à température douce et absence de gel, la plantation a lieu en novembre.

b. La culture de saison: se pratique dans toutes les régions, dont la mise en place de la culture est réalisée en Janvier au littoral, en Février- Mars dans les Plaines, et en Mars pour les hauts plateaux.

c. La culture d'arrière-saison: cette dernière se pratique dans des zones à grande possibilité d'irrigation où presque tout le cycle se déroule en absence de pluies.

Au littoral, la mise en place de la culture se fait en Aout-Septembre, et en Juillet sur les hauts plateaux.

8. Problèmes phytosanitaires de la culture

Les rendements moyens de la culture de pomme de terre en Algérie avoisinent les 200 q/ha, soit presque la moitié des rendements moyens obtenus dans le monde. Les problèmes phytosanitaires constituent l'une des causes de la limitation de ce paramètre. En effet, cette

culture est sensible beaucoup aux stress biotiques (maladies et ravageurs) et abiotiques (maladies physiologiques et accidents climatiques) (Ait Ouada et al., 2008).

II. Données générales sur la culture de tomate

1. Origine et historique

La tomate est originaire des régions andines côtières du Nord-Ouest de l'Amérique du Sud Colombie, Equateur, Pérou et Nord du Chili. Elle fut domestiquée au Mexique, puis introduite en Europe en 1544. De là, sa culture s'est propagée en Asie du Sud et de l'Est, en Afrique et en Moyen Orient (Naika, 2005). Considérée pendant longtemps comme une plante ornementale et toxique, ce n'est qu'au 18^{ème} siècle que la tomate a commencé à être consommée. Depuis cette époque, elle a connu un développement considérable, et cela dans tous les pays du monde (Philouze, 1999). En Algérie, elle fut cultivée pour la première fois près d'Oran, puis elle s'est étendue aux autres régions d'Algérie (Kolev, 1976).

2. Classification et description botanique

La tomate est connue sous le nom scientifique de *Lycopersicon esculentum* Mill., la tomate appartient à la famille des solanacées (Naika, 2005). La tomate est une plante annuelle, poilue aux tiges plutôt grimpante. Cette plante potagère herbacée voit sa taille varier de 40 cm à plus de 5 mètre selon les variétés et le mode de culture (Toussaint et Baudoin, 2010). La description botanique des différentes parties du plant de tomate sont indiquées dans le tableau (01) (Naika, 2005 ; Chauv et Fourry, 1994 et Polese, 2000)

Tableau 03. La classification systématique de *lycopersicum esculentum* (Benton , 2008)

Règne	Plantae
Sous- règne	Tracheobionia
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous classe	Asteridae
Ordre	Solanales
Famille	Solanacées
Genre	<i>Lycopersicum</i>
Espèces	<i>Lycopersicum esculentum</i>

Les plants de tomates appartiennent au groupe des plantes appelées plantes à fleurs ou angiospermes. Le plant de tomate se reproduit sexuellement, ce qui signifie qu'il faut des

organes féminins et masculins pour produire des graines. Chaque graine de tomate renferme une minuscule plante. Lorsque les conditions sont adéquates, les graines de tomate germent.

Tableau 04. Description des différentes parties d'un plant de tomate

Partie de plante	Description
Racine	Le système racinaire est puissant, très ramifié et a tendance fasciculé et qui peuvent atteindre 50 cm de profondeur.
Tige	Le port de croissance varie entre érigé et prostré. La tige pousse jusqu'à une longueur de 2 à 4 m. La tige est pleine, fortement poilue et glandulaire
Feuillage	Feuilles disposées en spirale, 15 à 50 cm de long et 10 à 30 cm de large. Les folioles sont ovées à oblongues, couvertes de poils glandulaires. L'inflorescence est une cyme formée de 6 à 12 fleurs
Fleur	Bisexuées, régulières et entre 1,5 et 2 cm de diamètre, la plante est autogame, mais la fécondation croisée peut avoir lieu.
Fruit	Est une baie charnue a placentation centrale, coloration très diverses selon les variétés .En général les fruits sont ronds et réguliers ou côtelés. Elles sont poilues, beiges, 3 à 5 mm de long et 2 à 4 mm de large.
Graine	L'embryon est enroulé dans l'albumen.

Source : Chiad, 2013

3. Cycle de développement

D'après Gallais et Bannerot (1992), le cycle végétatif complet de la culture de tomate varie selon les variétés, l'époque de culture et les conditions de culture et s'étend fréquemment de 3 à 4 mois à partir du semis, jusqu'à la dernière récolte (7 à 8 semaines de la graine à la fleur et 7 à 9 semaines de la fleur au fruit). Le cycle comprend six phases qui sont les suivantes :

3.1. La germination

C'est le stade levé qui mène la graine jusqu'à la jeune plante (Corbineau et Core, 2006). La germination chez la tomate est épigée, une température ambiante de 20°C et une humidité relative de 70 à 80 % sont indispensables (Chaux et Foury, 1994). Les graines de tomate germent mieux à l'obscurité qu'à la lumière (Benton, 2007).

3.2. La croissance végétative

La croissance de plant de tomate se déroule en deux phases et en deux stades de culture différents (Gallais et Bannerot, 1992):

En pépinière : de la levée jusqu'au stade six feuilles, on marque l'apparition des racines non fonctionnelles et des pré-feuilles.

En plein champ : après l'apparition des feuilles à photosynthèse intense et des racines fonctionnelles, les plantes continuent leur croissance. La tige s'épaissit et augmente son nombre de feuilles.

3.3. La floraison

C'est le développement des ébauches florales par transformation du méristème apical de l'état végétatif à l'état reproducteur. Cette phase dépend de la photopériode, de la température et les besoins en éléments nutritifs (Benton, 2007).

3.4. Pollinisation

Ce stade nécessite l'intervention des agents extérieurs, le vent ou certains insectes comme le bourdon, qui est capable de faire vibrer les anthères et libérer le pollen (Chaux et Foury, 1994). La libération et la fixation du pollen reste sous la dépendance des facteurs climatiques. Si la température nocturne est inférieure à 13°C, la plupart des graines de pollen seraient vides. Ainsi, une faible humidité dessèche les stigmates et il en résulte la difficulté du dépôt du pollen (Pesson et Louveaux, 1984).

3.5. Fructification et nouaison des fleurs

Ce stade représente l'ensemble des phénomènes de la gaméto-genèse, en partant de la pollinisation, la croissance du tube pollinique, la fécondation des ovules jusqu'au développement des fruits (Rey et Costes, 1965).

3.6. Maturation des fruits

La maturation se manifeste par un grossissement du fruit et un changement de coloration, du vert au rouge, grâce à la synthèse active de la matière organique assurée par la photosynthèse. Pour cela il faut une température nocturne de 18°C et 27°C le jour (Benton, 2007).



Figure 02. Cycle de croissance de la tomate

4. Exigences culturales

4.1. Exigences pédoclimatiques

4.1.1. Température et lumière

La culture de tomate est considérée comme une culture de saison chaude, qui exige un climat frais et sec (Elattir et al, 2003). Selon Naika (2005), la température optimale pour la plupart des variétés se situe entre 21 et 24°C. En-dessous de 10°C et au-dessus de 38°C, les tissus de la plante seront endommagés. La tomate est une culture neutre à la photopériode, mais exigeante en énergie lumineuse, notamment pour l'initiation florale (Philouze et Hedde, 1993).

Tableau 05. Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate.

Phase	T min (°C)	Intervalle optimale	T max (°C)
Germination des graines	11	16-29	34
Croissance des semis	18	21-24	32
Mise à fruits	18	20-24	30
Développement de la couleur rouge	10	20-24	30

4.1.2. Eau et humidité

L'alimentation hydrique est un facteur important du rendement et de qualité, entre autres du calibre. La tomate est gourmande en eau et une alimentation irrégulière entraîne une irrégularité du point de vue de l'apport en calcium et entraîne donc la nécrose apicale. Les besoins hydriques sont surtout importants à partir de la floraison du deuxième bouquet (Toussaint et Baudoin, 2010).

4.1.3. Sol

La tomate pousse bien sur la plupart des sols minéraux qui ont une bonne capacité de rétention de l'eau et une bonne aération (Naika, 2005). La teneur en matière organique du sol doit être assez élevée (2-3%) pour obtenir de bons rendements (Elattir et al, 2003). La tomate est une culture modérément tolérante à une grande variation de pH, un pH de 6.5 à 7.0 est favorable (Ravisé et al, 2000). En revanche, cette culture est considérée comme sensible à la salinité (Benton, 2007).

4.1.4. Le PH

L'espèce est très tolérante à l'égard du PH, le meilleur équilibre nutritionnel étant assuré entre 6.0 et 7.0 (Letard, 1995).

4.1.5. La salinité

La culture de la tomate tolère une conductivité électrique (CE) de l'ordre de 3 à 4.5 mmhos/cm. L'impact de la salinité est plus grave sur le rendement suite à la réduction du calibre du fruit. Donc elle doit être maintenue entre 1 et 2 mmhos/cm à 25°C en fonction du stade de la culture à saison (Skiredj, 2006)

4.2 Exigences en fertilisants

Afin d'obtenir des rendements élevés, la tomate a besoin de fertilisants. Il existe deux groupes d'engrais qui permettent d'apporter des éléments nutritifs : les fumiers organiques et les fertilisants chimiques (12% de N (azote), 24% de P (phosphore) et 12% de K (potassium)) (Naika, 2005).

5. Situation et importance économique

5.1. Dans le monde

La tomate est l'une des principales productions légumières dans le monde, et particulièrement dans les pays tropicaux et les pays du bassin méditerranéen, elle est cultivée dans plus de 130 pays sur une surface avoisinante 2,5 millions ha (Blancard, 2009). La production mondiale est estimée à 177 042 000 de tonnes en 2016 cultivé sur une surface d'environ 4,78 millions Ha (FAO, 2016).

5.2. En Algérie

Selon le MADR (2013), la tomate est cultivée sur tout le territoire national, y compris les oasis du sud du pays, en particulier la wilaya de Biskra qui produit presque la moitié de la production maraichère algérienne, avec 100 000 serres agricoles pour une production qui a atteint 2,8 millions de quintaux en 2012. Sinon on distingue quatre zones de production de tomate en Algérie :

Tableau 06. Zones de production de tomate en Algérie

Zones	Wilayas concernées	% de superficie
Zone Est	Skikda, El-Taref, Annaba, Guelma, Jijel.	84 %
Zone Centre	Blida, Alger, Boumerdes, Bejaia, Chlef, Tipaza, Ain Defla.	12 %
Zone Ouest	Rélizane, Mostaganem, Mascara, Sidi-Bel-Abbès, Tlemcen.	2,7 %
Zone Sud	Adrar, Biskra, Oued Souf.	1,3 %

Chapitre 02. Pilotage d'irrigation

L'irrigation consiste à apporter de l'eau aux plantes cultivées, par des procédés divers, afin de permettre leur développement normal lorsque les conditions de pluviométrie naturelle sont insuffisantes.

Le pilotage d'irrigation consiste à répondre aux questions suivantes :

- Quand arroser ? En tenant compte :

- Des besoins en eau des plantes ;
- Des réserves en eau du sol.

- Combien d'eau à apporter ? Pour déterminer les doses d'irrigation qu'il faut apporter en complément.

- Comment l'apporter ? En fonction :

- du mode d'irrigation ;
- du type de sol ;
- de la nature des cultures.

Le pilotage de l'irrigation vise à maintenir la teneur en eau du sol à un niveau suffisant pour satisfaire les besoins en eau de la culture en évitant les excès d'eau pouvant entraîner des risques d'asphyxie racinaire, les manques d'eau préjudiciables à la production et les hétérogénéités de distribution sur la parcelle.

1. Détermination des besoins en eau des cultures

Dans un premier temps, la détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant, aussi bien la plante elle-même que les données climatiques ou pédologiques de la région.

Selon Doorenbos et Pruitt (1975), le climat est l'un des facteurs qui influe le plus sur le volume d'eau que la culture perd par évapotranspiration. Les pratiques agronomiques, les techniques d'irrigation, les engrais, les infestations dues aux insectes et aux maladies peuvent aussi influencer le taux d'évapotranspiration.

1.1 Pourquoi déterminer les besoins en eau des cultures ?

Connaître la valeur des besoins en eau des cultures est à la base de :

1.1.1. Projet d'irrigation

Conception des réseaux d'irrigation (calcul du débit de dimensionnement des ouvrages).

1.1.2. Gestion des réseaux d'irrigation

S'expriment en termes d'efficacité influencé par la gestion de la ressource et la pratique des irrigations.

1.1.3. Planification de l'utilisation des ressources hydrauliques

Volume d'eau nécessaire pour l'irrigation et tous les besoins en eau simultanés qui cherche à la distribuer de ces ressources de manière équitable afin de satisfaire tous ses usages et besoins.

1.2. Comment déterminer les besoins en eau des cultures ?

D'après Doorenbos et Pruitt (1975). l'estimation de l'évapotranspiration en vue de la programmation de l'irrigation doit se faire en se fondant sur le calcul de l'évapotranspiration maximale (ETM) et de la pluie efficace (Pe).

1.2.1. Besoin en eau d'irrigation

Les besoins en eau d'irrigation au niveau du champ représentent le volume et la fréquence des applications d'eau nécessaires pour compenser les déficits en eau du sol pendant la saison végétative d'une culture donnée.

Pour calculer les besoins en eau d'irrigation au niveau du champ pour une culture déterminée, il faut établir un bilan hydrique, qui est réalisé en mesurant tous les apports naturels ou entrées d'eau (superficielles et souterraines) et toute pertes ou sorties d'eau opérées à l'échelle d'une parcelle cultivée (Zella, 2015).

1.2.2. Besoin en eau de culture (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) (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 :

$$ETM = kc \times ET0$$

ETM: évapotranspiration maximale d'une culture (mm),

Kc : coefficient cultural,

ETP : évapotranspiration de potentielle (mm).

1.2.3. Evapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) est l'une des composantes du cycle hydrologique les plus difficiles à quantifier du fait de sa complexité dans le système sol-plante-atmosphère (Xu et Singh, 1998). Son estimation est importante pour les programmes d'irrigation, la planification et la gestion

des ressources en eau (Xu et Singh, 1998; Adeboye et al., 2009; Jia et al., 2013 ; Heydari et al., 2014; Djaman et al., 2015).

1.2.3.1. Les différents concepts de l'évapotranspiration

A. L'évapotranspiration (ET)

C'est une combinaison de deux processus : l'évaporation et la transpiration.

L'évaporation (E), est générée par tout type de surface aquatique (lacs, fleuves, océans et sols inclus). La transpiration (T), est d'origine végétale.

L'évapotranspiration est un paramètre important pour des études climatologiques et hydrologiques ainsi pour la gestion de l'eau d'irrigation en agriculture (Figure 03).

B. Evapotranspiration potentielle (ETP)

Est nommée aussi, l'évapotranspiration de référence (ET₀). « l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas, contenu et homogène dont l'alimentation en eau n'est pas limitant et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique » (Allen et al., 1998). Elle dépend essentiellement des apports énergétiques et est indépendante des caractéristiques de la surface.

C. Evapotranspiration réelle (ETR) : elle correspond selon Steeve pepin et al., (2012), à la perte en eau effective d'un couvert végétal, soit la somme des quantités évaporée et transpirée, en tenant compte des diverses résistances au mouvement de l'eau (sol-plantes) et à la diffusion de la vapeur d'eau (feuilles-atmosphère).

En général, la demande atmosphérique (ETP) est supérieure à l'offre (ETR) : la réduction de l'évapotranspiration potentielle étant attribuable à la fermeture partielle des stomates et/ou à l'assèchement de la surface du sol.

Evapotranspiration maximale (ETM) d'une culture donnée est définie à différents stades de développement végétatif d'une culture donnée, lorsque l'eau est en quantité suffisante et que les conditions agronomiques sont optimales. L'ETM est liée à l'ETP par un coefficient cultural (K_c). C'est la quantité d'eau perdue par une végétation jouissant d'une alimentation hydrique optimale (bonne fertilité du sol, bonne état sanitaire...).

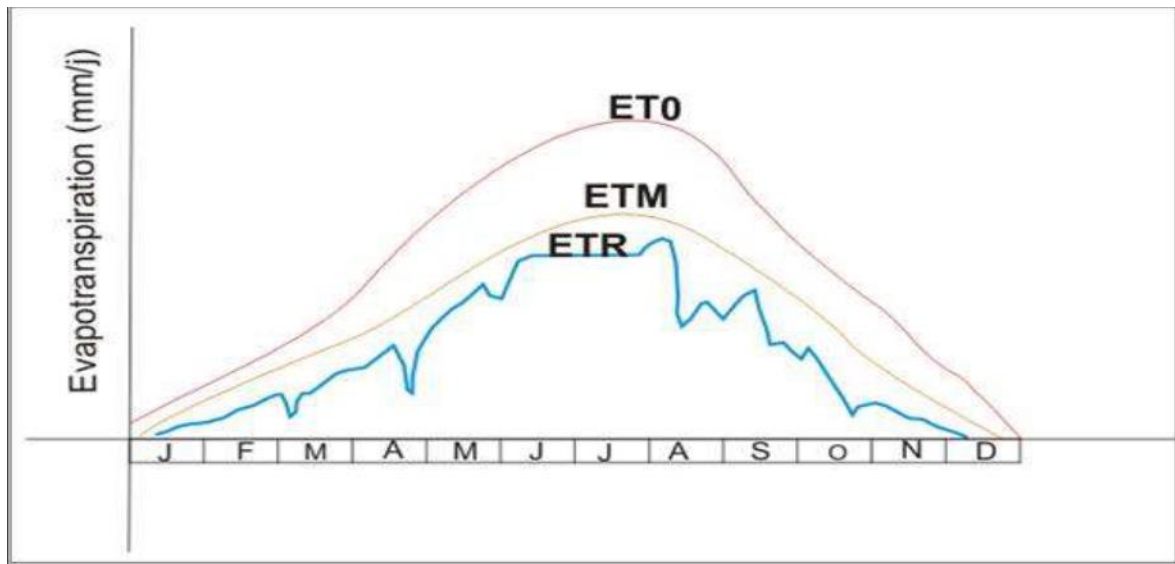


Figure 03. Schéma théorique de la variabilité annuelle de l'ET0, ETM et ETR
(Source : Chahbouni, 2009)

1.2.4. Choix du coefficient cultural

Par définition, le coefficient cultural (K_c) est le rapport entre l'évapotranspiration de la culture ETM et l'évapotranspiration potentielle ETP, il intègre les effets des 4 caractéristiques primaires qui distinguent une culture de la culture de référence qui sont: (la hauteur de la culture, la résistance de surface sol-végétation, l'albédo, l'évaporation de sol), (Allen et al, 1998).

Les facteurs qui influent sur la valeur de k_c sont : les caractéristiques de la culture, les dates de plantation ou de semis, le rythme de son développement et la durée de son cycle végétatif, les conditions climatiques, en particulier au début de la croissance et la fréquence des pluies ou des irrigations.

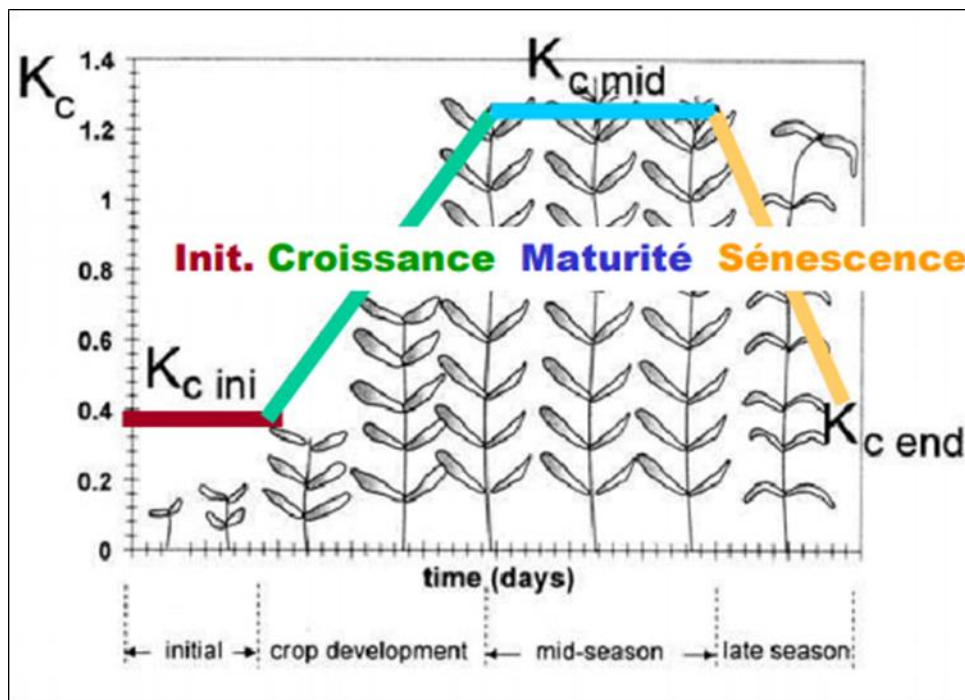


Figure 04. Courbe de coefficients culturaux et définition des phases (Doorenbos et Pruitt, 1975)

La courbe de K_c sur l'ensemble de la période de croissance a été présentée initialement par Doorenbos et Pruitt (1975). Elle permet de distinguer les 3 valeurs de K_c (initial, mi-saison, et d'arrière-saison). Les valeurs les plus élevées du K_c sont observées au printemps et en automne, lorsque le sol est encore humide. Les valeurs les plus basses sont notées en été (Allen et al, 1998).

Pour un cycle de culture donné, on distingue quatre phases :

- Initiale : du semis à un taux de couverture de 10%.

$K_c = K_{cINI}$, généralement faible, mais variant fortement en fonction de la fréquence des apports d'eau (pluie, irrigation)

- Croissance : jusqu'à couverture maximale (floraison, $LAI \approx 3$). $K_{cINI} < K_c < K_{cMID}$, fn de la partition évaporation/transpiration

- Maturité : jusqu'au premier jaunissement/chute des feuilles. $K_c = K_{cMID}$ est maximum et constant (généralement > 1)

- Sénescence : jusqu'à jaunissement complet ou à la récolte. $K_{cMID} < K_c < K_{cEND}$ (stade moins important en terme de besoin en eau et de pilotage de l'irrigation sauf dans le cas de cultures à récoltes multiples).

1.2.5. Les modèles d'ETP récentes dans la littérature

L'ETP est considérée comme une donnée climatique, ne dépend que des conditions atmosphériques, de l'énergie disponible à la surface évaporant et la résistance aérodynamique de couvert végétal. Ils existent des méthodes expérimentales pour la mesure directe de l'ET₀, basées sur le bilan hydrique, le bilan d'énergie et la méthode lys métrique. Devant la difficulté de la mise en place de ces dispositifs, différentes formules avec des degrés d'empirisme variables ont été développées depuis ces 50 dernières années pour estimer indirectement cette grandeur à partir de données climatiques. Elles sont classées en 4 groupes selon les paramètres utilisés (tableau 07).

Tableau 07. Modèles d'ETP recensés dans la littérature

Classification	Méthode	Données nécessaires	Pas de temps
Combinatoires	Penman (1948)	c_d, T, u, D	Journalier
	Penman-Monteith (1965)	c_d, T, u, D	Journalier
	Priesley-Penman (1972)	T, D	Journalier
	Kimberly-Penman (1982)	c_d, T, u, D	Journalier
	Thom-Olivier (1977)	c_d, T, u, D	Journalier
Aérodynamique	Dalton (1802)	c_d, u	Journalier
Température	Thornthwaite (1948)	T, D	Mensuel
	Blaney-Cridde (1959)	T, D	5 jours
	Hamon (1961)	T	Journalier
	Romanenko (1961)	c_d, T	Journalier
	Linacre (1977)	c_d, T	Journalier
Rayonnement	Turc (1961)	c_d, T, D	Journalier
	Jensen-Haise (1963)	T	5 jours
	Mc Guinness-bordne (1972)	T	Mensuel
		T	10 jours
	Hargreaves (1975)	c_d, T, u, D	Journalier
	Doorenbos-pruit (1977)	c_d, T, D	Journalier
	Abtew (1996)	T	Journalier
	Makkink (1957)		

(Ludovic, 2004, In Zella, 2015)

2. Outils de pilotage de l'irrigation

Comme nous l'avons mentionné auparavant, le pilotage de l'irrigation aura donc pour but, d'éviter le stress hydrique sur l'ensemble du cycle de la culture afin d'avoir une production maximale sans contrainte d'alimentation en eau, et l'optimisation de l'utilisation de l'eau quand les ressources sont limitées.

2.1. Mesure de l'état hydrique du sol

2.1.1. Mesure du potentiel hydrique par des sondes tensiométriques

Le potentiel hydrique du sol indique la force qui doit être développée par les racines pour extraire l'eau du sol: c'est une mesure robuste de la disponibilité en eau pour les plantes. L'irrigation peut être déclenchée lorsque le potentiel hydrique du sol atteint une certaine valeur, souvent dépendante du type de culture (Hanson et al, 2000a). Des valeurs de références sont présentées dans différents ouvrages, mais peuvent aussi être acquises de manière empirique.

1.1.2. Tensiomètre à eau

Le principe du tensiomètre à eau est de mesurer directement le potentiel hydrique du sol (Zazueta and Xin, 1994). Le dispositif comporte un tube relié à une extrémité par une bougie poreuse en contact avec le sol et bouché à l'autre extrémité. Le tube est rempli d'eau; l'eau du réservoir en s'équilibrant avec la solution du sol provoque une dépression dans le tube, qui peut être mesurée à l'aide d'un manomètre, une colonne de mercure ou un capteur de pression relié à une centrale d'acquisition (Dukes et al, 2010).

1.1.3. Capteurs à matrice granulaire/ Watermark

Le principe de cet appareil est de mesurer la résistivité électrique au sein d'une matrice poreuse grâce à deux électrodes. L'appareil est enterré dans le sol et l'eau du sol entre en équilibre avec la solution de la matrice. A partir d'une mesure de la résistivité électrique au sein d'une matrice poreuse, il est possible de déterminer le potentiel hydrique du sol grâce à une courbe de rétention en eau de cette matrice (Intrigliolo et Castel, 2004).

1.1.4. Bloc de gypse

Le principe de cet appareil, proche des capteurs à matrice granulaire, est de mesurer la conductivité électrique au sein d'un bloc de gypse. La mesure de conductivité est reliée au potentiel hydrique du sol (Ψ) par des courbes de référence liant les deux variables (Zazueta and Xin, 1994). Le dispositif se compose de deux électrodes qui sont placées dans une

solution saturée en sulfate de calcium (qui joue le rôle d'électrolyte) : le bloc de gypse absorbe l'eau du sol et la conductivité est mesurée (Dobriyal et al. 2012).

1.2. Mesure de la teneur en eau du sol

Méthode directe Il est possible de déterminer directement l'eau contenue dans le sol par une mesure gravimétrique correspondant à la différence de poids d'un échantillon de sol frais et sec après séchage à 105°C pendant 24h (Bittelli, 2011; Dobriyal et al. 2012).

1.2.1. Sondes capacitives

Le but est de mesurer la permittivité diélectrique du sol mesurée grâce à un champ magnétique à une fréquence connue (Dobriyal et al, 2012; Gaudu et al, 1993).

1.2.2. Humidimètre TDR (time domain reflectometry)

Comme pour les sondes capacitives, la méthode TDR est basée sur la mesure de la permittivité, liée à la constante diélectrique de l'eau. Le principe de l'appareil est cependant différent : il mesure la vitesse à laquelle se propage une onde électromagnétique dans le sol, laquelle est modifiée avec l'eau contenue dans le sol (Dobriyal et al, 2012).

1.2.3. Humidimètre à neutrons

Le principe de cette méthode est de mesurer la vitesse d'atténuation d'un rayonnement émis, comme des neutrons générés à partir d'une source radioactive. Ceux-ci sont lancés à grande vitesse par une source, et sont ensuite ralentis lorsqu'ils rencontrent les atomes d'hydrogène contenus dans les molécules d'eau (Evet and Steiner, 1995).

1.2.4. Radar sous-terrain

Le principe est de mesurer les variations d'ondes radio (générées par une antenne radar) grâce à un récepteur qui détecte les variations dans les propriétés électriques des ondes en détectant une part du signal qui est réfléchi (Chanzy et al, 1996).

1.3. Mesure de l'état hydrique des plantes

Le potentiel hydrique du sol, relié à sa teneur en eau, est un des moteurs de la circulation de l'eau dans la plante. Cependant il est aussi possible d'estimer les variations de conduction ou de contenu en eau des plantes en se basant sur des mesures micromorphométriques d'épaisseur de la feuille ou du diamètre de la tige ou des fruits. Il est également possible de mesurer directement les flux dans la sève, ou d'estimer le potentiel hydrique des feuilles à partir d'une chambre à pression (Jones, 2004).

1.3.1. Epaisseur de la feuille

Lorsque la plante manque d'eau, la feuille devient plus fine du fait de la diminution de la pression de turgescence (Jones 2004).

1.3.2. Diamètre de la tige

Les variations journalières du diamètre de la tige reflètent l'état hydrique de la plante car il y a des échanges d'eau entre les faisceaux du xylème (sève brute) et les cellules du parenchyme. Les variations du diamètre des tiges ont été bien étudiées pour les plantes ligneuses (Génard et al. 2001).

1.3.3. Flux de sève

Le but est de mesurer le flux de sève au sein du xylème (sève brute) qui renseigne sur le statut hydrique de la plante : plus la plante transpire, plus le potentiel osmotique est négatif au sein du xylème (De Swaef and Steppe, 2010).

2. L'opération de pilotage d'irrigation

L'opération de pilotage est délicate, nécessite la combinaison de plusieurs facteurs qui sont : climat, sol, plante, et moyens techniques ; Permet l'établissement d'un calendrier d'irrigation où est définie pour chaque irrigation la date et la dose jugée optimales.

Les décisions à prendre pour conduire les irrigations sont :

2.1. Choix de la date d'irrigation

Ce qui répond à la question « quand irriguer? » qui nécessite la connaissance de la réserve en eau du sol (RFU), et le suivi de l'état hydrique de la plante, pour déclencher l'irrigation.

2.2. Choix de la dose et de la fréquence d'irrigation

Il s'agit de savoir combien doit-on apporter à la culture et à quelle fréquence, on connaissant au préalable ses besoins en eau et le rendement qu'on espère obtenir.

Dans la pratique, on a 3 possibilités de choix :

- dose fixe et intervalle entre irrigation variable,
- dose variable et intervalle fixe,
- dose variable et intervalle variable.

2.3. Choix de mode d'irrigation

Pour satisfaire les besoins en eau de la culture, le choix de mode d'irrigation doit prendre en considération les contraintes techniques (eau, coût de matériel, culture, énergie, main d'œuvre) et l'efficacité de système.

2.4. Modélisation

Le recours à la modélisation est l'un des moyens les plus récents. Nous disposons actuellement d'un certain nombre de modèles informatisés permettant d'évaluer les besoins en eau des cultures (AquaCrop, CropWat, etc.). Ce type de modèle permet d'estimer les besoins en eau des cultures. Il permet également d'étudier judicieusement ces informations en vue d'une utilisation rationnelle des ressources hydriques sur la base des données climatiques.

Chapitre 3. Modélisation agronomique

1. Modèles de culture

1.1. Définition et historique

La modélisation est couramment utilisée dans le domaine de l'agronomie pour aider les chercheurs et les scientifiques à mieux comprendre les liens complexes entre les actions humaines, le contexte pédoclimatique et les réponses de l'agro écosystème. Mais aussi dans un objectif d'aide à la décision, les modèles permettent d'analyser de manière systémique les conséquences d'une modification de la conduite d'une culture et d'évaluer les risques associés à de telles modifications.

Depuis plus de 25 ans, l'utilisation des modèles en agronomie ne cesse de s'accroître permettant ainsi d'étudier les différents aspects liés à la croissance et au développement des plantes.

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

En 1984, le premier modèle générique EPIC a été développé pour répondre à des préoccupations agro-environnementales. Il a ensuite donné naissance au modèle CROPSYST.

Au début des années 1990, des modèles à vocation uniquement environnementale apparaissent tels que DAISY et PASTIS. En 1996, le nouveau modèle agronomique STICS a vu le jour (Brisson et al., 1998, 2003, 2009), qui a été développé à l'INRA d'Avignon en France.

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

La tendance actuelle consiste en la mise au point de modèles génériques et agroenvironnementaux qui prennent en compte l'effet des pratiques agricoles. C'est le cas du modèle AquaCrop et CropWat, développé au sein de la FAO (Organisation pour l'alimentation et l'Agriculture des Nations Unies), et qui est destiné à la prédiction de la production des

cultures sous des conditions de stress hydrique. Il a pour but aussi de développer des capacités de mise au point de stratégies de gestion des exploitations agricoles, de rationalisation de l'utilisation des ressources en pour améliorer la productivité.

2. 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 :

2.1. 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 définit en tant que système, de proposer les relations les plus apte à représenter son comportement. La caractérisation équivaut à une postulation de principe, facilitée par une bonne connaissance théorique de l'objet.

2.2. 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.

2.3. La vérification

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

2.3. 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.

3. Concept de base en modélisation

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

3.1. Système

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

3.2. Modèle

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

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

3.3. Paramètres

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

3.4. Modules

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

4. Typologie des modèles de cultures

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

4.1. 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.

4.2. 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.

Les modèles de cultures se situent à l'interface des deux catégories présentées (Hammer et al., 2002). Etant constitués d'un ensemble d'équations mathématiques formalisant les hypothèses sur le fonctionnement du système sol-plante et regroupées par processus, ils peuvent être considérés comme mécanistes. Cependant, ils peuvent intégrer des relations de type empirique entre les variables caractérisant les différents processus.

La plupart des modèles de cultures ont besoin de nombreuses variables difficiles à mesurer. Ces variables sont généralement mieux connues des scientifiques que des agriculteurs ou des autres utilisateurs finaux, par exemple l'indice de surface foliaire et le potentiel hydrique des feuilles.

Les modèles de culture doivent être calibrés pour des emplacements et des cultures spécifiques avant de s'appliquer à des utilisations pratiques. Les modèles nécessitant un grand nombre de paramètres d'entrée augmenteraient la difficulté d'étalonnage et d'utilisation. Par conséquent, un modèle de culture simple mais précis est souhaité. Pour cela la FAO a développé plusieurs modèles de culture notamment AquaCrop et CropWat, pour répondre à cette préoccupation.

5. Description des modèle AquaCrop et CropWat

5.1. Le modèle AquaCrop

AquaCrop est un modèle de productivité des cultures et de l'eau, développé par la Division des Terre et des Eaux de la FAO depuis 1998. Ce modèle a subi plusieurs modifications avant que ses développeurs ne le mettent sous sa dernière version (version 3.1) publiée en Mars 2011. Le modèle AquaCrop simule le comportement du système sol-plante durant une ou plusieurs saisons agricoles. Ce système est, d'une part, limité supérieurement par l'atmosphère, caractérisée par les variables climatiques standards (température maximale et minimale de l'air, rayonnement net, pluie, vitesse du vent et évapotranspiration de référence)

et d'autre part, il est limité inférieurement par l'interface sol/sous-sol. La culture est caractérisée principalement par ses biomasses souterraines et aériennes (dont celles des organes récoltés) ainsi que par sa fraction de couvert défini comme étant la surface totale des feuilles par unité de surface du sol et mesurée en m^2/m^2 (Watson, 1947).

En le comparant avec les autres modèles, on pourra dire qu'AquaCrop est un outil simple, convivial et facile à utiliser. Il nécessite un nombre significativement plus réduit, garantissant la précision et la robustesse des résultats.

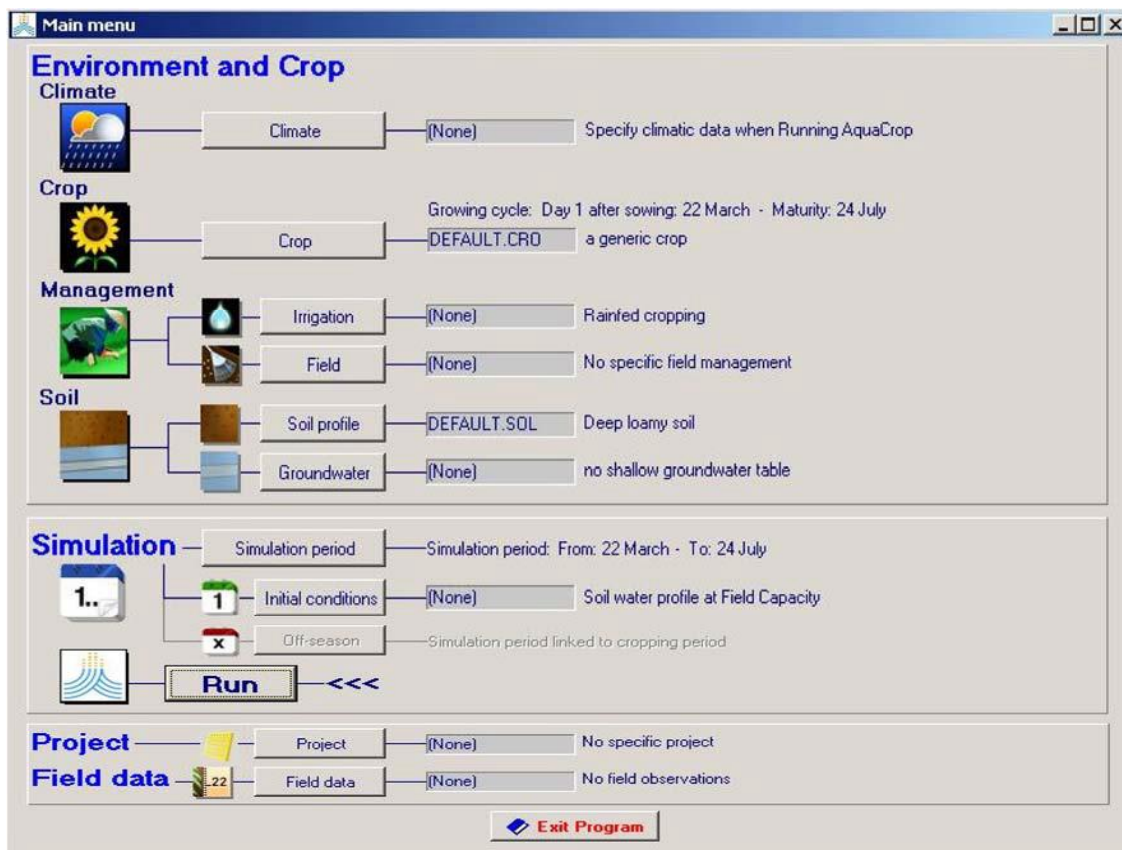


Figure 05. Interface du modèle AquaCrop

But de logiciel AquaCrop

Il exécute les fichiers de projets successifs. Ensuite, les résultats des modélisations, identiques à ceux générés avec l'interface, sont directement enregistrés dans des dossiers prédéfinis. Travailler avec l'extension permet d'économiser beaucoup de temps aussitôt que l'ensemble des fichiers d'entrée a déjà été formaté (Raes et al. 2012).

5.2. Le modèle CropWat

Le modèle CropWat est un support d'aide pour l'irrigation des cultures développé par la FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations), basé sur le calcul du bilan hydrique. Il est utilisable pour toutes les sortes de culture et dans différentes régions climatiques. Sa fonction principale est de déterminer le besoin en eau des cultures et de développer des schémas d'approvisionnement en eau. Pour cela, le modèle calcule l'évapotranspiration de référence, basée sur l'équation de Penman-Monteith et en fonction de données météorologiques. Celles-ci sont listées dans la suite de ce chapitre. Le logiciel offre également la possibilité de développer un calendrier d'irrigation des cultures, d'évaluer les effets du manque d'eau sur les cultures, ainsi que l'efficacité des différentes pratiques d'irrigation (Van Laere, 2003). Le modèle peut utiliser des données d'entrée à un pas de temps journalier, décadaire ou mensuel. Dans le cadre de ce travail, les données d'entrée du modèle sont utilisées à un pas de temps journalier. Les résultats sont eux présentés à un pas de temps mensuels.

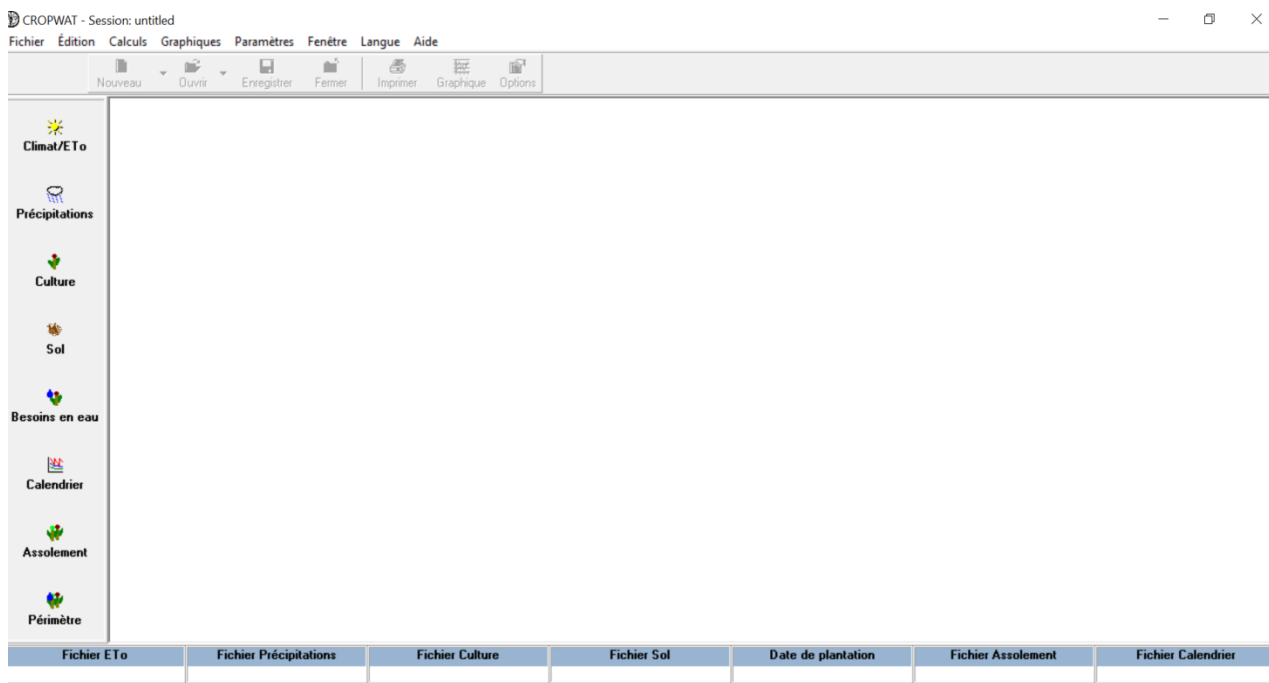


Figure 06. Fenêtre principale du logiciel CropWat.

But de logiciel CropWat

Ce logiciel a été conçu dans le but de calculer l'évapotranspiration, les besoins en eau des cultures et plus particulièrement la conception et la gestion de dispositifs d'irrigation.

Il est également utilisé pour déterminer le rendement agricole. Toutefois, il est possible de l'utiliser pour faire des calculs de rendement sans irrigation.

Nous pouvons aussi utiliser ce programme pour observer des périodes de déficits en eau dans le sol, donc un stress hydrique pour la plante entraînant une baisse du rendement.

L'emploi du logiciel peut être utile pour déterminer le type de culture qui aurait la meilleure productivité en fonction des précipitations et de l'humidité du sol de la période.

5.3. Les données d'entrées

Les modèles AquaCrop et CropWat exigent les données affichées dans le tableau 08 pour qu'ils soient fonctionnels.

Tableau 08. Les données d'entrée des modèles AquaCrop et CropWat

	AquaCrop	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 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Zéro de végétation - Durée de stade de floraison - Densité des plants - Type de la culture C3 ou C4 - Moment de l'émergence - Couverture maximale de la canopée - Indice de récolte - Type de méthode de plantation 	
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"> - Teneur en eau initiale - Pratiques culturales (fertilisation, salinité) 	<ul style="list-style-type: none"> - L'eau disponible initiale

5.4. Données de sortie

Une fois toutes les données d'entrées saisies, les modèles AquaCrop et CropWat calculent automatiquement les résultats, ils les affichent soit sous forme des tableaux ou bien des graphes. Le pas de temps des résultats peut être n'importe quel pas de temps pratique : quotidien, décennal ou mensuel.

Les paramètres de sortie du programme sont détaillés dans le tableau suivant :

Tableau 09. Les données de sorties des modèles AquaCrop et CropWat

AquaCrop	CropWat
<ul style="list-style-type: none"> - Evapotranspiration potentielle - Pluie efficace - Besoin en eau d'irrigation - Besoin en eau des cultures - Calendrier d'irrigation 	
<ul style="list-style-type: none"> - Estimation du rendement - Estimation de la biomasse - Quantifier séparément l'Ev et la Tr - Estimation de la productivité de l'eau - Estimation de LAI 	<ul style="list-style-type: none"> - Irrigation brute totale - Irrigation nette totale - Déficit d'eau à la récolte - Efficience des précipitations - Perte d'irrigation - Crop Kc (valeurs moyennes du coefficient de culture pour chaque pas de temps)

Matériels et méthodes

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons traiter les caractéristiques de la région de la wilaya d'Tiaret, particulièrement sa situation géographique et les facteurs édaphiques, climatiques et agronomique.

I. Présentation de la zone d'étude

1. Situation géographique de la zone d'étude

La wilaya de Tiaret, région du centre ouest algérien, capitale des Rostémides fondée en 787 par Ibnou Rostom, elle fait partie intégrante de la région physiographique des hauts plateaux ; distance a plus de 300 kilomètres au sud-ouest de la capitale. Elle côtoie plusieurs wilayas et constitue un relis entre les régions du N-W et celles du sud.

Sur le plan administratif, elle compte, 14 Daïras et 42 communes. Elle est délimitée au nord, par les wilayas de Tissemsilt et Relizane ; au sud, par les wilayas de Laghouat et El Bayadh ; à l'ouest, par les wilayas de Mascara et Saïda ; à l'est, par la wilaya de Djelfa. Ou les coordonnées géographiques grossièrement sont au nord, x : 2° 40' 19" E et y : 35° 43' 09" N ; Au centre, x : 1° 35' 1.7" E et y : 34 53' 41" N ; et au sud, x : 0° 31' 4,34" E et y : 34° 03' 37" N.



Figure 07. Situation géographique de la wilaya de Tiaret

2. caractéristique physique

2.1 Relief

D'une manière générale, 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. Les pentes généralement comprises entre 2 et 16 %

Par ailleurs, les zones steppiques faisant partie des hautes plaines algéro-oranaises se dressent le massif du Nador relié au sud est aux monts de chellala. Cet ensemble constitue les zones arides pré atlasiques.

2.2. Géologie

Il est intéressant de connaître la nature géologique des sols de la wilaya de Tiaret ce que permet de comprendre l'impact sur les degrés d'érosion. Géologiquement la wilaya de Tiaret est constituée de deux grandes unités distinctes.

La première représente le domaine Quaternaire couvrant le Sersou ; le Miocène inférieur qui s'étale de Tiaret à Dahmouni ; l'Oligo-Miocène correspond au sud de Tiaret, l'Eocène calcaire se trouve au nord-ouest de la wilaya s'étalent de rahouia a Djillali Ben Amar et enfin le Miocène supérieur et moyen relatif à l'ensemble de Mechraa Sfa Tagdempt et Djebel Guezoul.

Le jurassique supérieur domine le massif de Sdama et qui repose essentiellement sur des formations calcaires et Marino-calcaire. IL forme aussi de grands affleurements au nord de Takhmaret de Benkhada sur l'ouest de Mina en. En fait, il s'agit de marnes et d'argiles à bancs de grés.

Le Crétacé recouvert par le sénonien de Mellakou_Sougeur : c'est crétacé de la Mina qui s'étend jusqu'au piémont du Nador vers l'Est et au Sud de Tiaret vers le Nord et au Djebel Chebka vers le Chott El Chergui au Sud.

b. La deuxième représente le domaine pré-atlasique couvrant particulièrement les zones steppiques. La partie Sud est constituée de formations d'origine marine et continentale attribuées au Crétacé.

Entre L'Atlas tellien et l'Atlas saharien s'enclavent des dépressions fermées (Chott Zahrez, Chott Chergui et des dayas), de formations souvent détritiques tertiaire et quaternaire qui reposent sur les séries du secondaire (Othmane, 2003).

Le massif du Nador qui s'individualise au sein de cet espace steppique a 40km au Sud-Est de Tiaret aligné sensiblement SO6NE sur une cinquantaine de kilomètres. C'est une chaîne des hauts plateaux au climat continental.

2.3. Hydrogéologie

2.3.1. Les eaux superficielles

La wilaya de Tiaret est alimentée par deux grands bassins versants, (les bassins du Cheliff et des hauts plateaux oranais), à l'intérieur de ces deux bassins versants, on recense quatre sous bassins versants drainés par 889 km d'oueds pérennes et de 1049 km de cours d'eau intermittents. Il s'agit des oueds : Abd, Mechti, Mina, Rhiou, Souslem, Taht, Tiguiguet et Touil.

La capacité d'eau que dispose la wilaya est estimée à 100 hm³, à l'origine des 1525 hm³ que draine le Cheliff. Les 100 hm³ sont alimentés à partir des barrages Bekhada, Dahmouni, Bougara avec les capacités respectives de 45, 42 et 13 hm³

2.3.2. Les eaux souterraines

Près de 80 du volume global des ressources hydriques souterraines de la wilaya sont localisés dans la zone steppique ; elle renferme trois principales nappes à savoir :

_Le Sersou, renferment des horizons aquifères dans les dépôts calcaires marneux du plio-quadernaires.

_Oued Touil, qui présente des horizons aquifères dans les dépôts de sable, limon, poudingue du Quaternaire, argilo sableux du Pilo Quaternaire, grés granulaire du Miocène et du Barenno alpin, dolomie de calaire du Kimméridgien.

_Chott Chergui, présente des horizons aquifères dans les niveaux grossiers de base du Tertiaire continental, calcaire sénonien, calcaire et dolomie de l'Aeleno-Bajo- Batonien.

Avec un total de 44.60 hm³ /an, les principales ressources en eau souterraines sont réparties

2.4. Types de sol

La figure 8 représente géographiquement des types de sols les plus dominants dans la wilaya de Tiaret

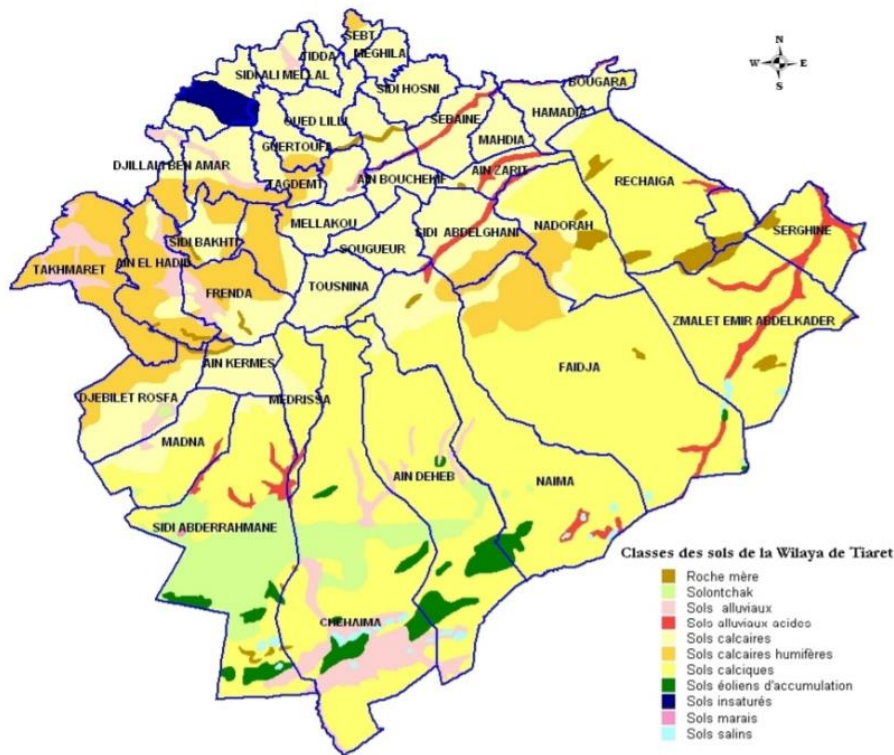


Figure 08. Distribution des classes des sols dominants dans la wilaya de Tiaret

2.4.1. Occupation du sol

La wilaya de Tiaret occupe le premier rang national dans la production céréalière, le premier dans la production d'oignons, ainsi que les cultures des tomates et des pommes de terre qui occupent la superficie importante dont l'état élabore un plan pour étendre le cycle d'exportation dans le sens de la pomme de terre.

Les agriculteurs sont orientés vers la culture des légumineuses après le début de beaucoup d'entre eux contrôlant la technologie de leur culture, en particulier des lentilles de bonne qualité, dont elle double la production et réduire la facture d'importation des légumineuses.

2.5. Climatologie

Le climat de la wilaya de Tiaret est type semi-aride. En effet le régime pluviométrique est caractérisé par une irrégularité interannuelle et saisonnière (pluie en hiver, sécheresse en été), avec une précipitation moyenne annuelle estimée à 475,1 mm. La majorité des précipitations se concentre entre Novembre et Mars avec une grande variabilité intra annuelle et interannuelle; les régimes thermiques sont relativement contrastés de type continental avec une saison estival alternant avec une saison hivernale pluvieuse, fraîche si non froide.

II. Evaluation des besoins en eau des cultures par AquaCrop et CropWat

En termes d'économie d'eau, la maîtrise des besoins en eau des cultures permet d'agir sur les doses à apporter et donc d'économiser de façon significative la consommation en eau. Pour cela, la FAO a mis en place des outils simples et efficaces, facile d'utilisation et rapide pour le calcul des besoins en eau des cultures, notamment les modèles **AquaCrop** et **CropWat**

La détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance les paramètres suivants :

- Les données climatiques donneront les informations nécessaires concernant les besoins en eau de la culture ;
- Les paramètres pédologiques permettront d'estimer la réserve utile du sol ;
- Les données culturales préciseront 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 les modèles AquaCrop et 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 (%). Ces données ont été récoltées à travers des bulletins de l'ONM et des sites météorologiques s'étalent sur une période de 28 ans (1990-2018). Les mesures prises, à un pas de temps mensuel.

2. Les données liées à la culture

Les données liée à la culture se diffèrent d'un modele a un autre Car AquaCrop a ses propres paramètres et CropWat également et c'est ça l'avantage d'utiliser les deux modèles.

2.1. AquaCrop

AquaCrop utilise un nombre relativement réduit de paramètres explicites et de variables d'entrée qui sont facilement disponibles ou qui nécessitent des méthodes simples pour leur détermination. Le tableau 10 montre les paramètres d'entrés liés à la culture.

Tableau 10. Paramètres d'entrés exigés par le modèle AquaCrop

Paramètres	valeurs
Température de base (°C)	5,5
Température supérieure seuil (°C)	30
Nombre de plantes par hectare	185000
Méthode de plantation/semis (semis direct ou transplantation)	15cm/plant
Le temps du semis à l'émergence	5 jours
Moment de floraison	47 jours
Durée du stade de floraison	50 jours
Moment du début de sénescence de la canopée	110 jours
Moment où la maturité est atteinte (c'est à dire la durée du cycle de culture)	125 jours
Indice de récolte (%)	75%
Productivité de l'eau g/m ²	17
Profondeur maximale d'enracinement	0,5 à 1,5 m

2.2. CropWat

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. Le facteur de réponse du rendement, K_y , qui permet d'estimer les réductions de rendement dues au stress hydrique (Langlois, 2006)

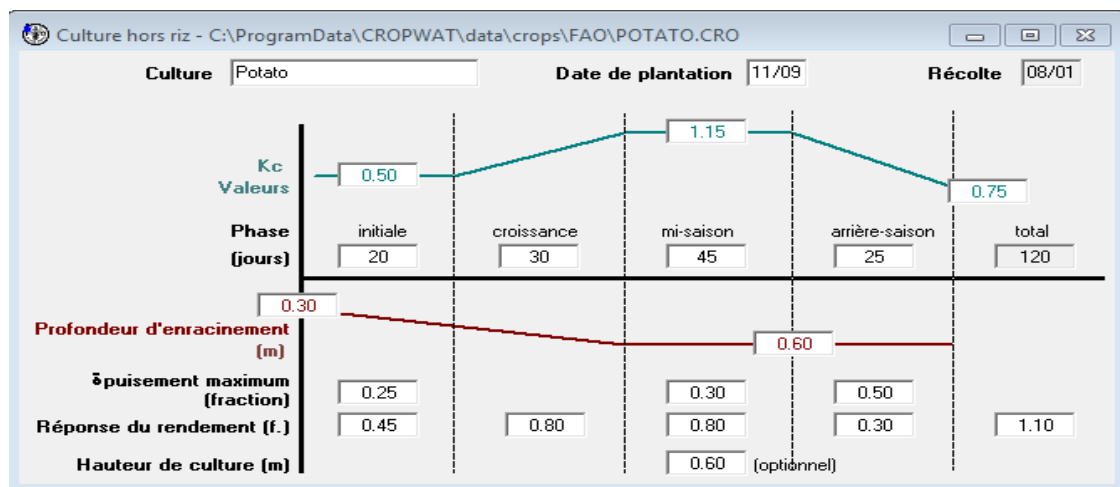


Figure 09. Données liées à la culture

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**

D'après la FAO (1987), les valeurs de RU selon les différentes textures de sol considérées généralement sont comme suit :

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

Vu la diversité des différents types de sols de la wilaya de Blida (plaine de la Mitidja), il en ressort que la plupart des sols sont du type alluvionnaires à lourds, pour cela, nous avons opté dans le cas de notre étude pour un sol moyen ayant les caractéristiques suivantes :

Données générales sur le sol		
Nom du sol	Moyen	
Eau disponible totale (CC - PF)	140.0	mm/mètre
Taux d'infiltration maximum de l'eau de pluie	40	mm/jour
Profondeur maximum d'enracinement	60	centimètres
Épuisement de la teneur en eau initiale (en % TAM)	0	%
Eau disponible initiale	140.0	mm/mètre

Figure 10. Données d'entrées liées au sol.

4. Calcul l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration de référence (ET₀) 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.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + g \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + g(1 + 0,34U_2)}$$

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

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:

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

$$P_{eff} = 125 + 0.1 \times P_{mois} \quad \text{pour } P_{mois} > 250 \text{ mm} \quad (2)$$

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

6. Calcul les besoins en eau des cultures

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 (ET_m) 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 :

$$ET_m = kc \times ET_0$$

ET_m : évapotranspiration maximale d'une culture (mm),

kc : coefficient cultural,

ET₀ : évapotranspiration de référence (mm).

7. Etablir des calendriers d'irrigation

La planification de l'irrigation détermine la mesure correcte de l'eau à irriguer et l'heure correcte pour arrosage. Les modèles CropWat et AquaCrop calcule l'ET0, les besoins en eau des cultures et les besoins en eau d'irrigation pour développer les programmes d'irrigation dans des conditions d'administration et des plans d'approvisionnement en eau différents.

8. Calcul l'efficience d'utilisation de l'eau (EUE)

L'efficience (EUE) est définie par le rapport du rendement à l'eau consommée par la culture, c'est à dire l'évapotranspiration réelle (ETR). On peut donc écrire :

$$\mathbf{EUE (kg/m^3) = Rdt / ETR.....(13)}$$

Où :

EUE : l'efficience d'utilisation de l'eau (kg/m³) ;

Rdt : le rendement de la culture (kg) ;

ETR : l'évapotranspiration réelle de la culture (m³).

Résultats et discussions

1. Analyse des paramètres climatiques

1.1. Pluie

La figure 11 illustre la variabilité interannuelle de la pluviométrie durant de la série climatique (1990 à 2017).

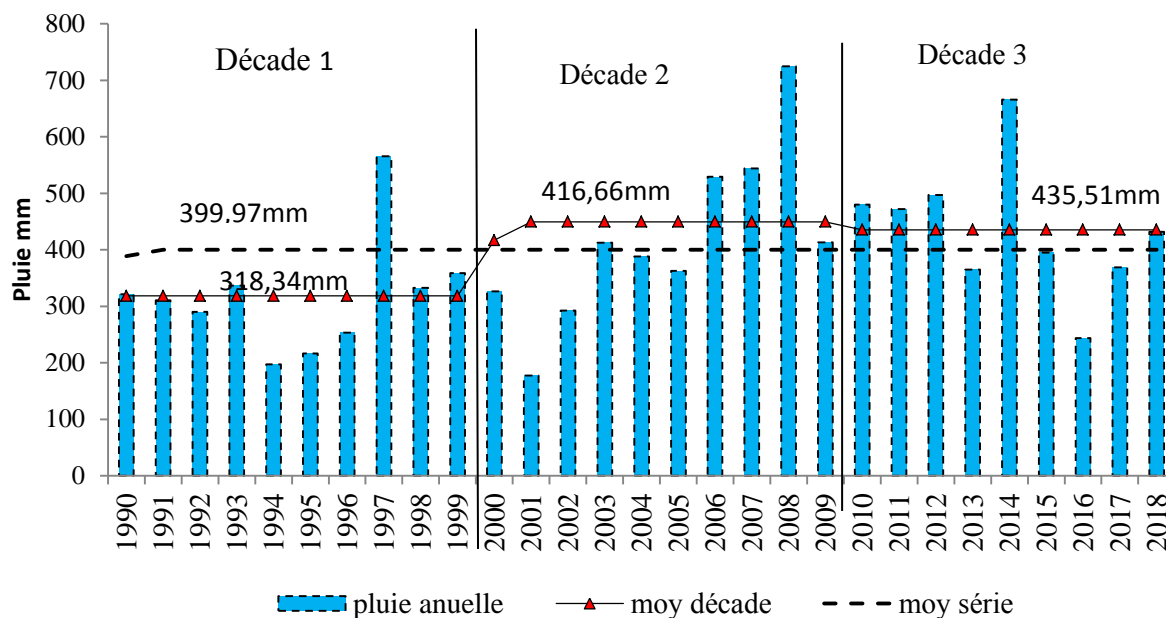


Figure 11. Variabilité interannuelle de la pluie (1990-2018)

Les résultats obtenus montrent une variation hétérogène des intensités pluviométriques sur la région d'étude. La valeur moyenne annuelle de la pluie estimée sur la période d'étude (1990-2017) est de l'ordre de 399,97 mm, fluctue entre 874,80 mm et 177 mm. L'analyse de ce graphique nous a permis de déterminer l'année excédentaire (2006), l'année déficitaire (2001).

1.2. Température

Les relevés moyens mensuels des températures enregistrées sur la période d'étude (1990-2017) sont présentés dans la figure 11. D'après cette figure, il est constaté que la moyenne mensuelle du mois le plus froid est de 1,48 °C et celle du mois le plus chaud est de 34,41 °C, elle correspond, respectivement, pour le mois de janvier et juillet.

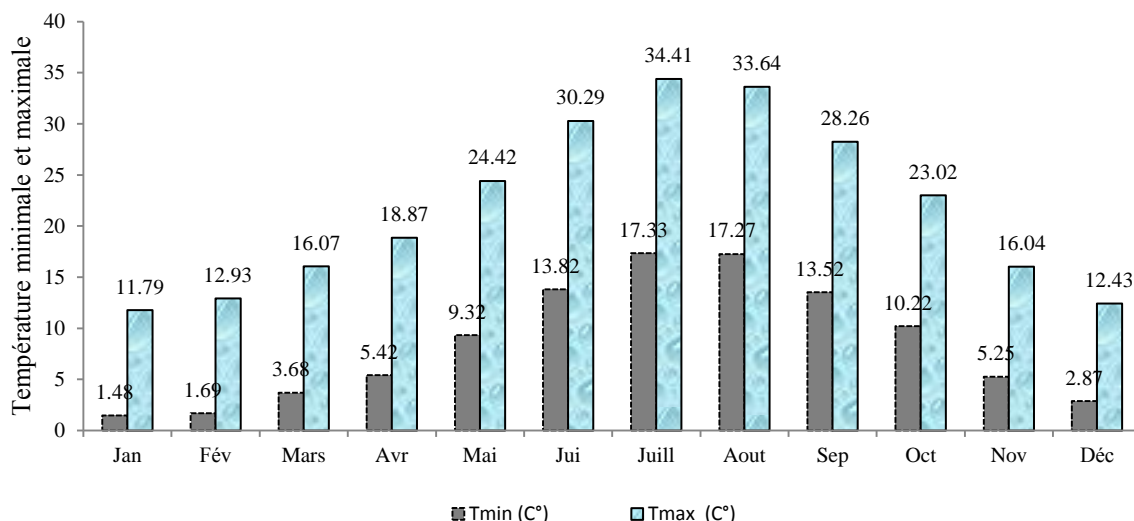


Figure 12. Températures moyennes mensuelles (1990-2017)

1.3. Humidité de l'air

L'humidité relative de l'air est un élément du cycle hydrologique qui contrôle l'évaporation du sol et le couvert végétal. L'humidité moyenne mensuelle pour la période d'étude (1990-2017) est illustrée par la figure 12.

Il est constaté que le mois le plus humide est le mois décembre avec 76,08 %, par contre le mois le moins humide coïncide avec le mois juillet (38,38 %).

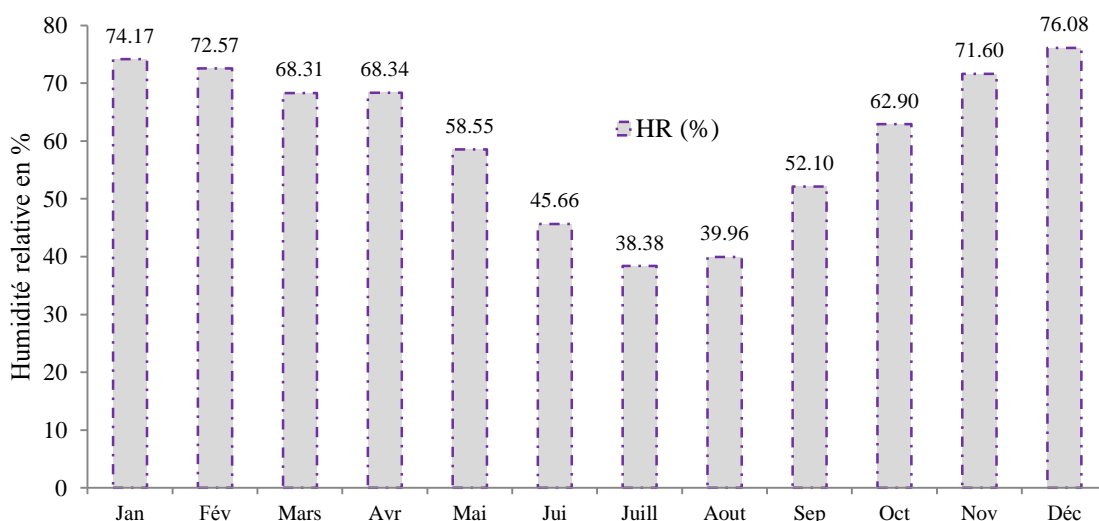


Figure 13. Humidités relatives moyennes mensuelles (1990-2017)

1.4. Vitesse du vent

Il s'agit d'un facteur important aussi bien sur un plan agronomique que du point de vue de l'aménagiste puisque il reste un élément déterminant dans le choix de type d'irrigation (aspersion ou gravitaire) ainsi que dans l'élaboration du système de protection des périmètres (réseau de brise-vent).

La figure 14 montre les tendances de la vitesse du vent, elle représente la vitesse moyenne maximale du vent en mai (18,42 km/h), et la vitesse minimale, vitesse observée en octobre (16,31 km/h).

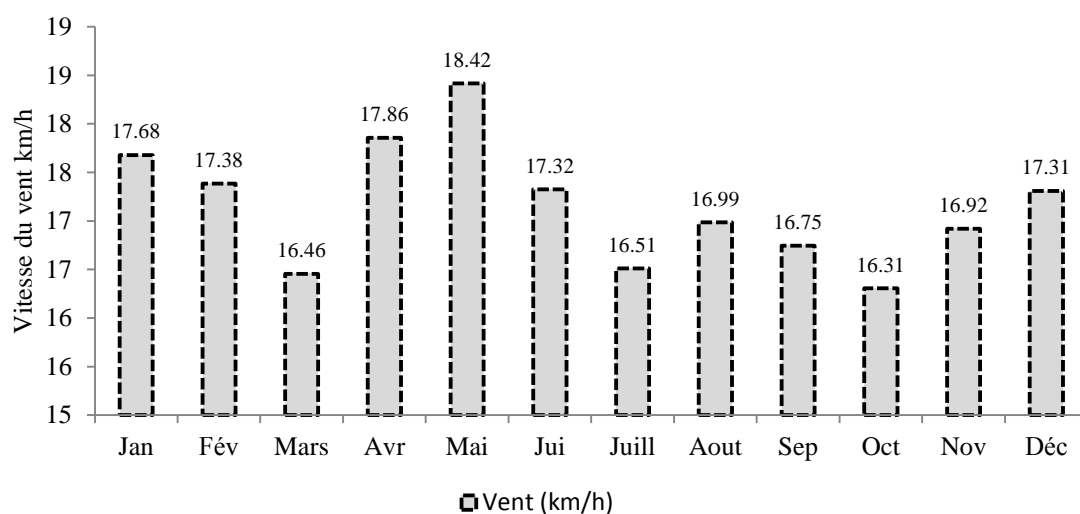


Figure 14. Vitesse du vent moyenne mensuelle pour la période d'étude (1990-2017)

1.5. Insolation

La figure 15 illustre la variation de la durée d'ensoleillement durant la période d'étude, il est constaté que l'ensoleillement maximum est en mois de juin (11,51 h) et juillet (11,48 h) et la durée minimum est en mois de décembre (6h12).

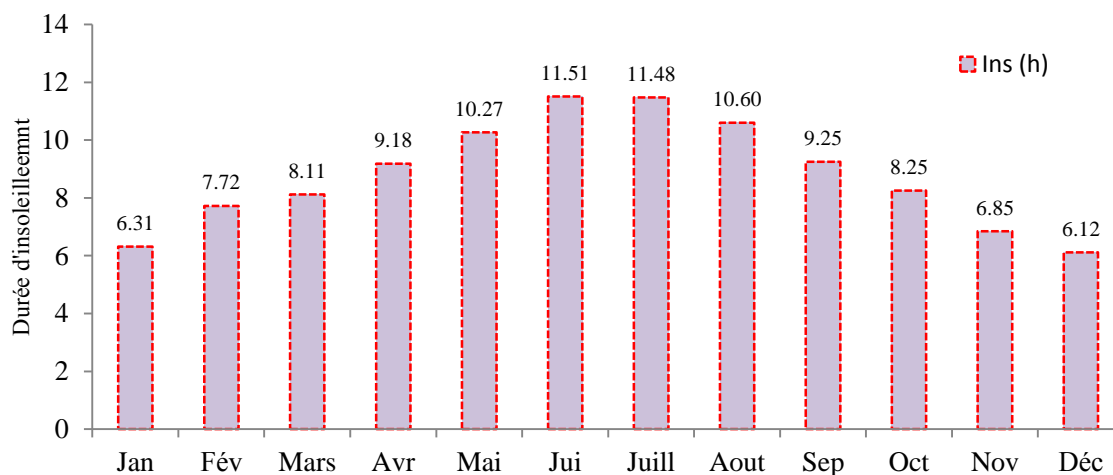


Figure 15. Variation de la durée d'ensoleillement pour la période 1990-2017

2. Calcul de l'évapotranspiration de référence

2.1. A l'échelle de l'année

L'évapotranspiration de référence (ET₀) 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.

La figure 16 illustre la variation interannuelle de l'évapotranspiration de référence (ET₀) sur une période de 28 ans (1990-2017). Il est constaté que la moyenne annuelle de l'ET₀ est de l'ordre de 972,47 mm, fluctue entre un minimum de 863,46 mm et un maximum de 1055,46 mm.

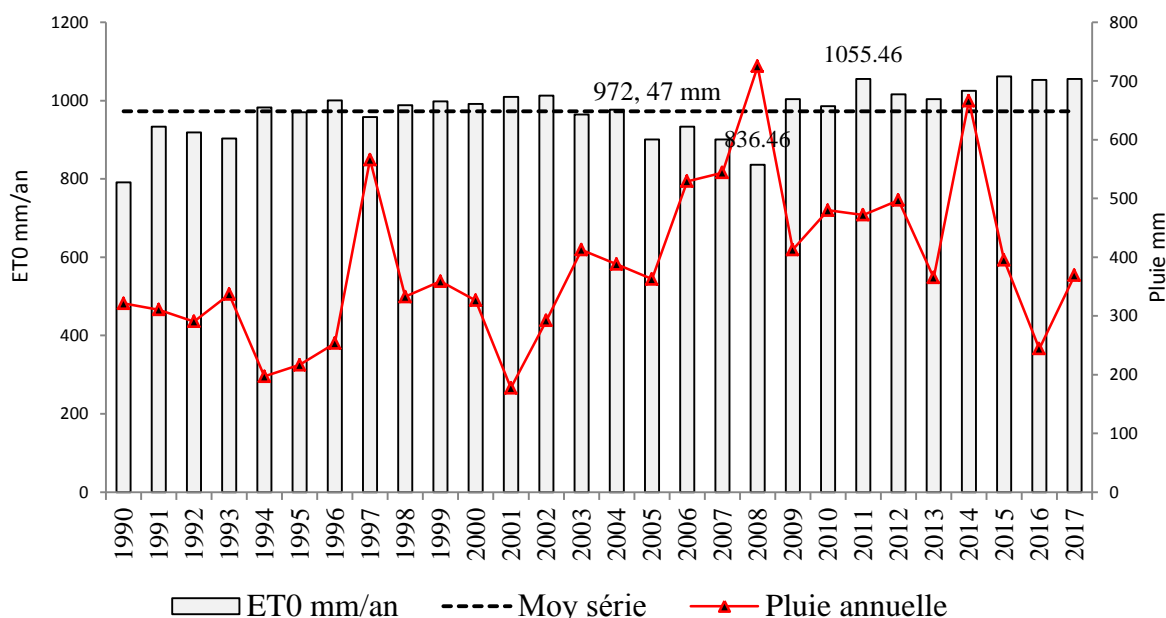


Figure 16. Variation interannuelle de l'évapotranspiration de référence, période (1990-2017)

2.2. A l'échelle de la saison de culture

La figure 17 illustre la variation interannuelle de l'évapotranspiration de référence (ET₀) à l'échelle de la saison de croissance des cultures en questions, sur une période de 28 ans (1990-2017). Il est constaté que les moyennes annuelles de l'ET₀ de la tomate et de la pomme de terre sont, respectivement, de 434,11 et 381,68 mm. L'évapotranspiration de référence (ET₀) enregistrée durant la saison de culture de la tomate (avril – juillet) est plus élevée par rapport au celle de la pomme de terre, car la saison de culture de la tomate

coïncide avec la fin du printemps et début de l'été où les températures ne cessent d'augmenter et les pluies sont négligeables.

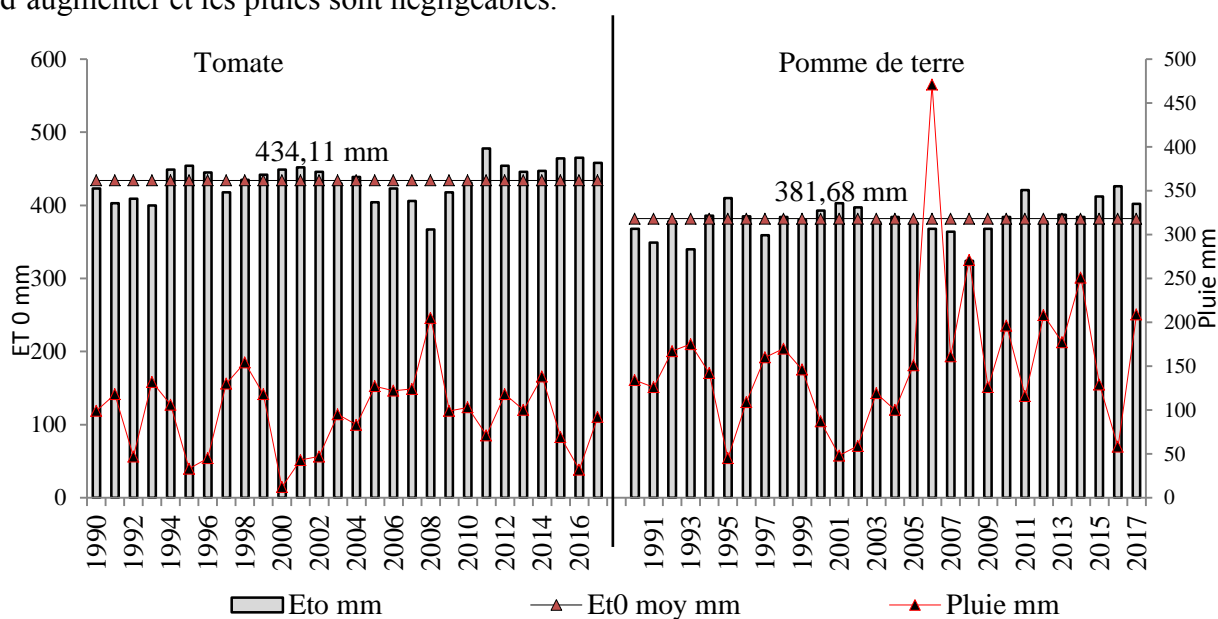


Figure 17. Variation interannuelle de l'évapotranspiration de référence à l'échelle de la saison de culture, période (1990-2017)

3. Calcul de la pluie efficace

3.1. A l'échelle annuelle

Pour les productions agricoles, les précipitations efficaces se réfèrent à la fraction des précipitations qui peuvent être effectivement utilisées par les cultures. La totalité des précipitations n'est pas disponible pour les cultures des tomates et pomme de terre puisqu'en effet une partie est perdue par ruissèlement et/ou par percolation en profondeur.

La figure 18 montre la variation interannuelle de la pluie efficace totale durant la période d'étude (1990-2017). Il est constaté que la moyenne de la pluie efficace totale sur cette période est de l'ordre de 341,09 mm, fluctue entre un minimum 168,80 mm (2001) et un maximum 649 mm (2008).

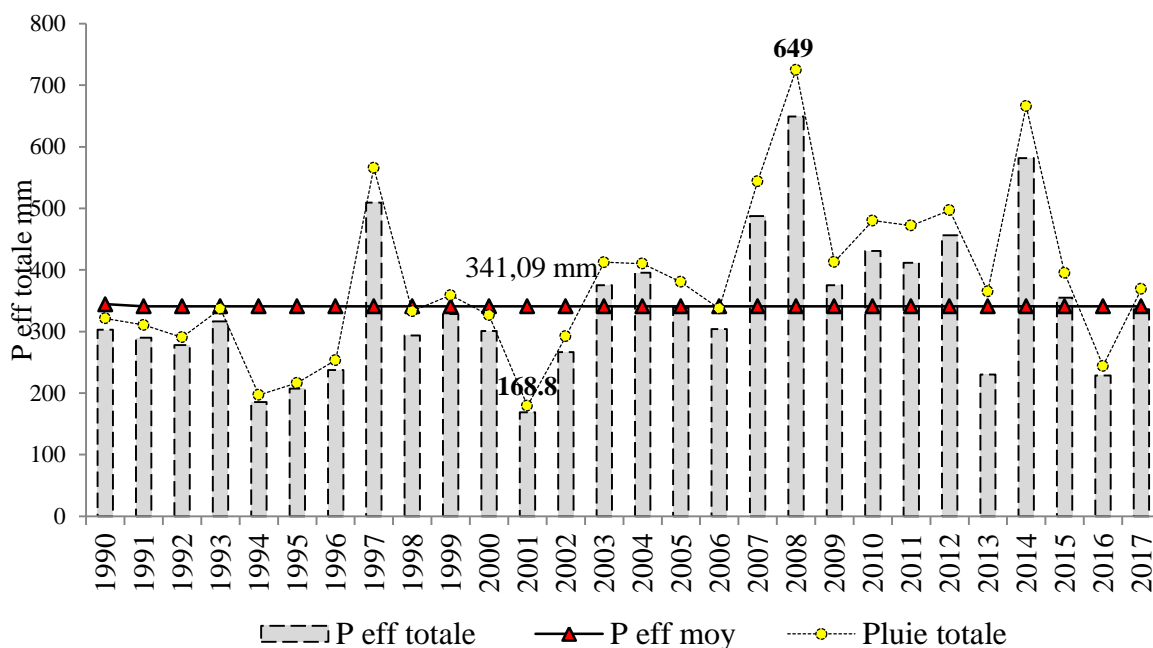


Figure 18. Variation interannuelle de la pluie efficace totale, période (1990-2017)

3.2. A l'échelle saisonnière

Les pluies efficaces bénéficiées par la culture de la tomate et de la pomme de terre sont illustrées par la figure 19. Il est constaté que la moyenne de la pluie efficace durant la saison de culture de la tomate est de l'ordre de 95,70 mm par contre celle de la pomme de terre est de 137,88 mm. Une différence de 42,18 mm, qui est expliquée par la variation de la période des saisons de culture.

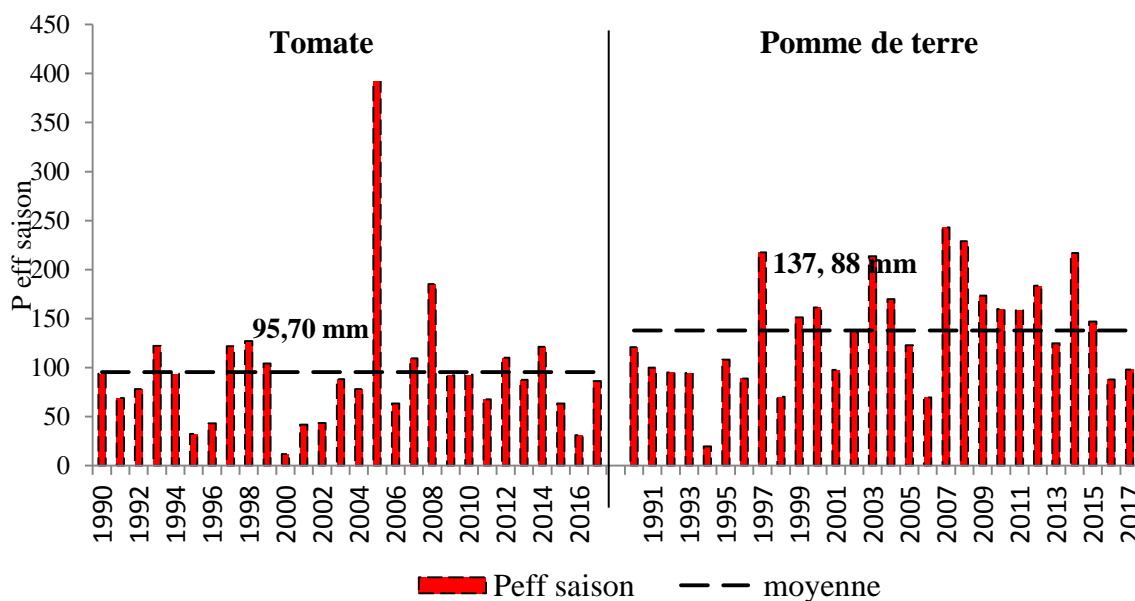


Figure 19. Variation interannuelle de la pluie efficace à l'échelle saisonnière, période (1990-2017)

4. Calcul du besoin en eau des cultures

4.1. Tomate

Les besoins en eau de la culture (ETc) de la tomate estimés par le modèle CropWat et AquaCrop sont illustrés par la figure 20. D'après cette figure, il est constaté que les valeurs moyennes de l'ETc de la tomate estimées par le modèle CropWat et AquaCrop sont, respectivement, de l'ordre de 415,85 et 418 mm. Ces valeurs se situent dans la fourchette signalée par la FAO qui varie de 400 à 600 mm selon le climat. Par contre Doorenbos et Kassam (1979) a signalée que les besoins totaux en eau (ETm) après repiquage de cette culture sont variés de 500 à 600 mm selon le climat de la région et la variété de la culture.

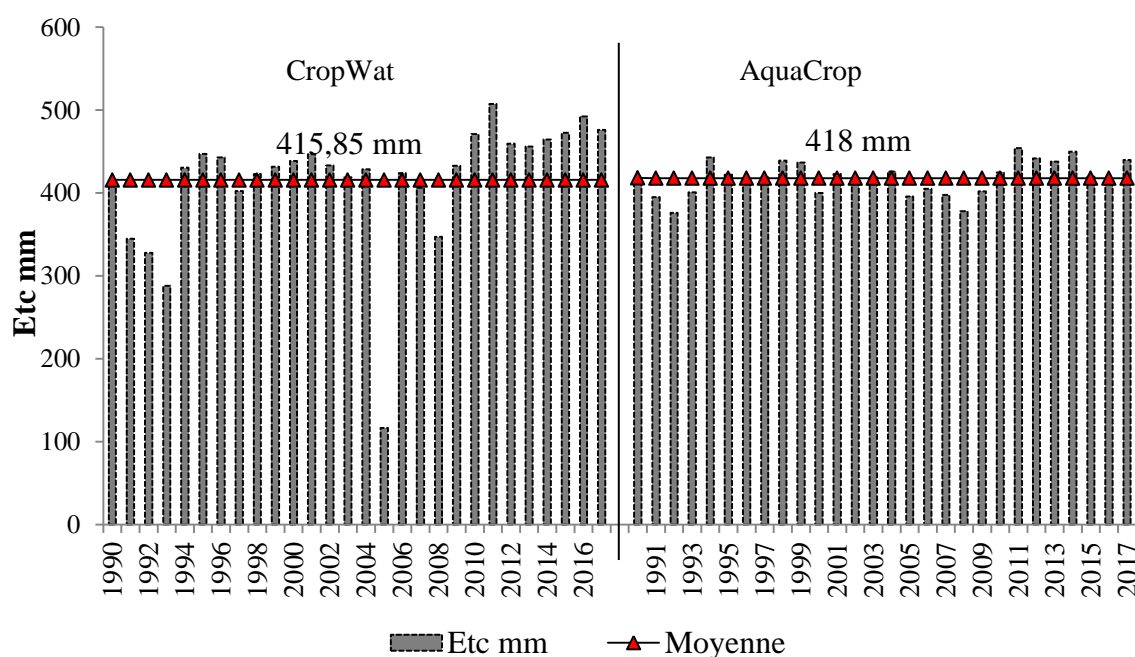


Figure 20. Variation interannuelle du besoin en eau de la tomate (ETc) estimé par le modèle CropWat et AquaCrop

4.2. Pomme de terre

Les besoins en eau de la culture (ETc) de la pomme de terre estimés par le modèle CropWat et AquaCrop sont illustrés par la figure 21. D'après cette figure, il est constaté que les valeurs moyennes de l'ETc de la pomme de terre estimées par le modèle CropWat et AquaCrop sont, respectivement, de l'ordre de 519,8 et 523,82 mm. Ces valeurs se situent dans la fourchette signalée par la FAO qui varie de 500 à 700 mm selon le climat.

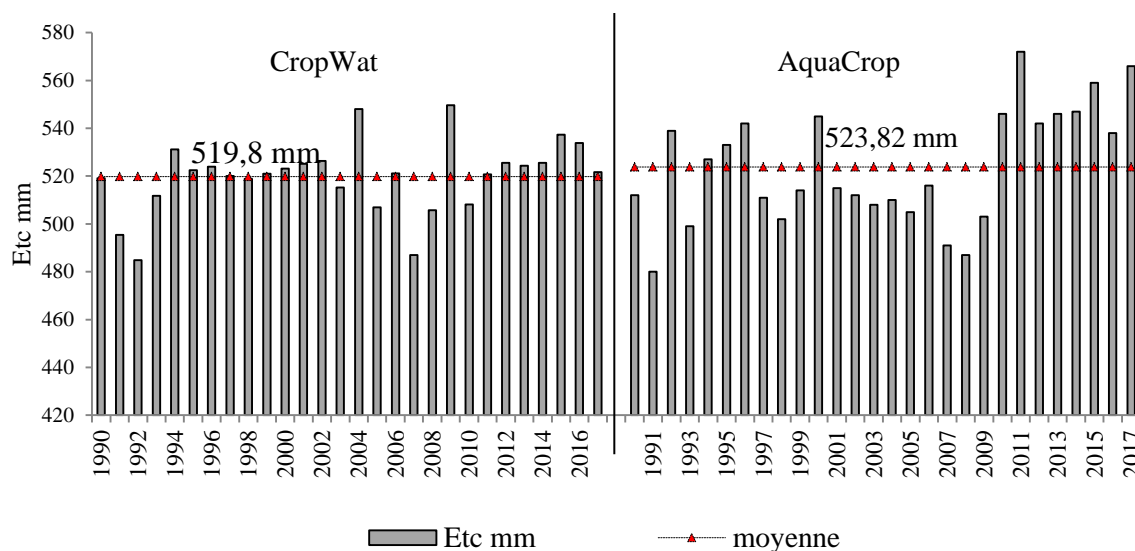


Figure 21. Variation interannuelle du besoin en eau de la pomme de terre (ETc) estimé par le modèle CropWat et AquaCrop

5. Calcul du besoin en eau d'irrigation

5.1. Tomate

Les besoins totaux en irrigation de la culture (BEI) de la tomate estimés par le modèle CropWat et AquaCrop sont illustrés par la figure 22. Il est constaté que les valeurs moyennes de BEI de la tomate estimées par les deux modèles CropWat et AquaCrop sont respectivement, de l'ordre de 349,22 et 351,82 mm. D'après cette figure, il est clair que les deux modèles ont suivi la même tendance.

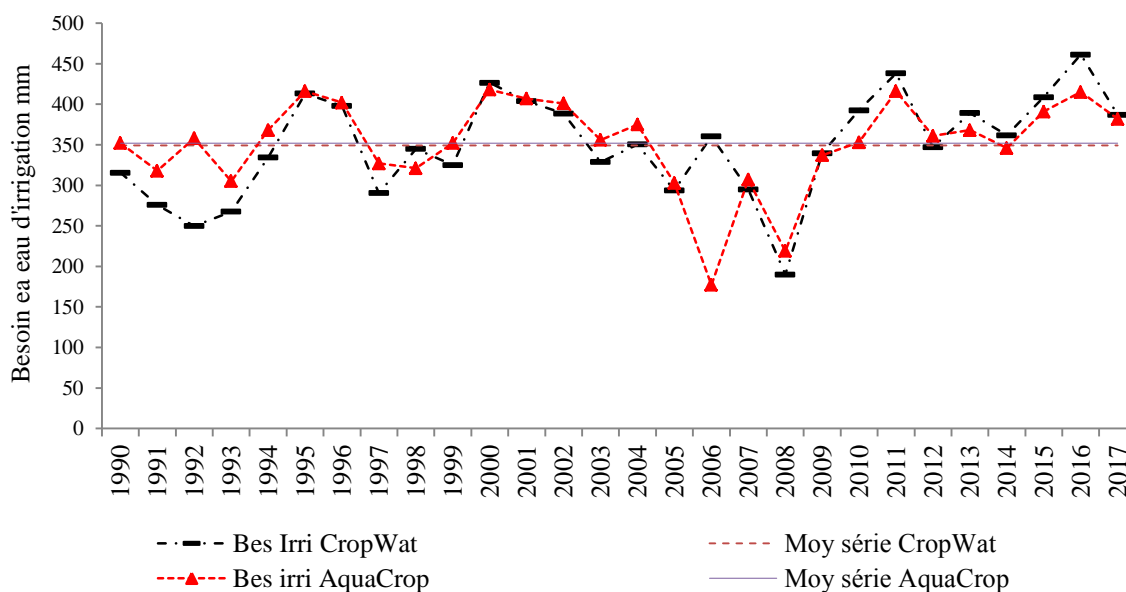


Figure 22. Variation interannuelle du besoin en eau d’irrigation (BEI) de la tomate estimé par le modèle CropWat et AquaCrop

5.2. Pomme de terre

Les besoins totaux en irrigation de la culture (BEI) de la pomme de terre estimés par le modèle CropWat et AquaCrop sont illustrés par la figure 22. Il est constaté que les valeurs moyennes de BEI de la pomme de terre estimées par les deux modèles CropWat et AquaCrop sont respectivement, de l’ordre de 395,64 et 380,63 mm. D’après cette figure, il est clair que les deux modèles ont suivi la même tendance.

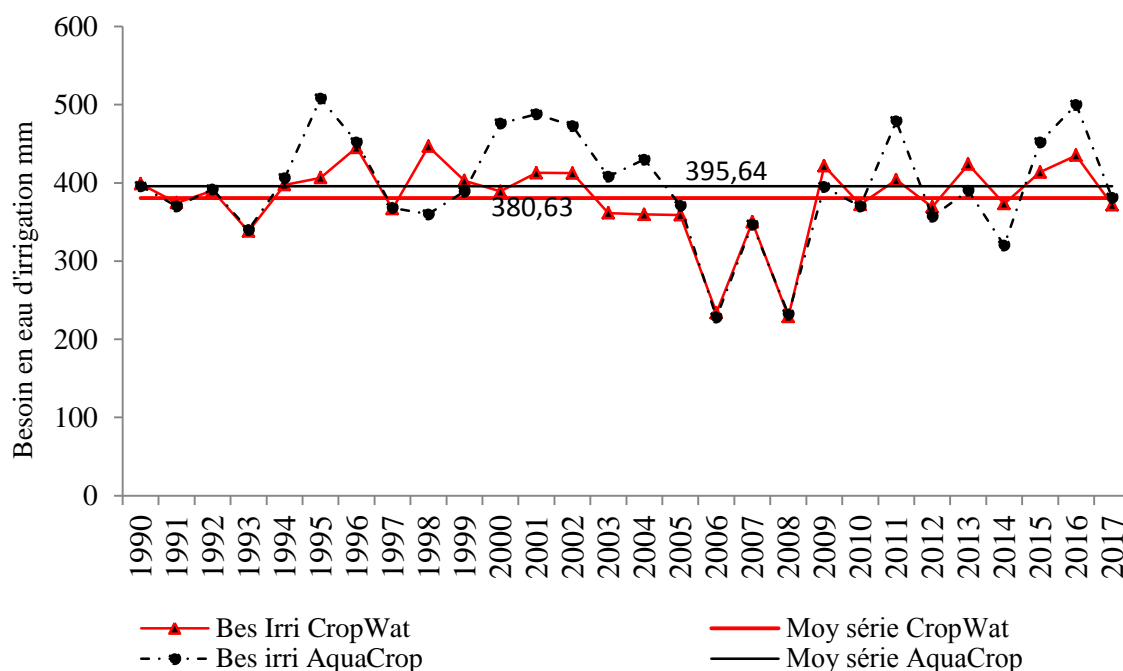


Figure 23. Variation interannuelle du besoin en eau d’irrigation (BEI) de la pomme de terre estimé par le modèle CropWat et AquaCrop

6. Calcul d’efficacité d’utilisation de l’eau

6.1. Tomate

L’efficacité d’utilisation de l’eau (EUE) a été calculée comme le rapport entre le rendement de la culture cultivée et la consommation d’eau pendant toute la phase de croissance, en utilisant cette mesure comme une approximation de l’EUE de la tomate. L’EUE reflète l’utilisation efficace de l’eau dans la production agricole.

Pour recenser les rendements des cultures en question (Tomate et pomme de terre) dans la wilaya de Tiaret, nous avons eu recours à la « série B 1 » du Ministère de l’Agriculture et du Développement Rural.

La figure 24 montre la fluctuation interannuelle de l'EUE pour la culture de la tomate pour une période de 19 ans (1998-2017). Il est constaté que les valeurs moyennes annuelles de l'EUE estimées sur toute la période par les modèle CropWat et AquaCrop sont, respectivement, est de l'ordre de 7,24 et 7,47 kg/m³. Il est constaté que la valeur de l'EUE estimée par les modèles CropWat et AquaCrop est plus élevée pour l'année 2008 et plus baisse pour l'année 2001. Ceci est expliqué par les quantités de pluie reçus durant la saison de culture (Avril- Juillet) qui sont, respectivement, 180,87 mm (2008) et 45 mm (2001). L'EUE est augmentée par l'augmentation de la consommation en eau. Cette observation concorde avec celle signalée par plusieurs chercheurs (Badr et al., 2010 ; Hassanpanah, 2010 ; Badr et al., 2012).

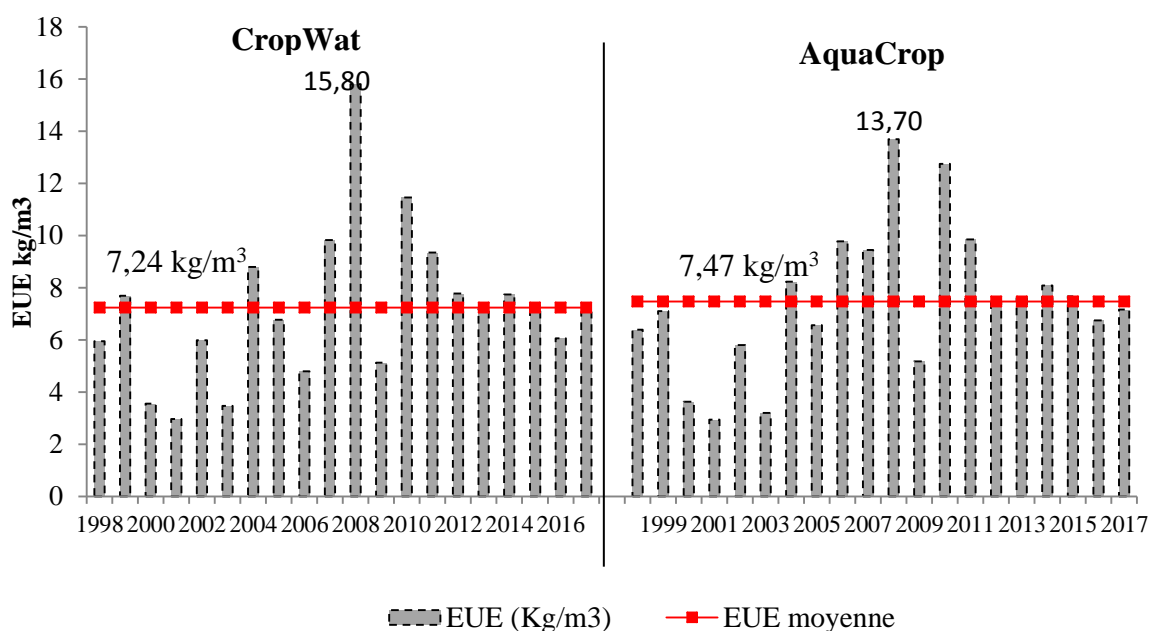


Figure 24. Efficacité d'utilisation de l'eau pour la culture de la tomate estimée par le modèle CropWat et AquaCrop

6.2. Pomme de terre

La figure 25 montre la fluctuation interannuelle de l'EUE pour la culture de la pomme de terre pour une période de 19 ans (1998-2017). Il est constaté que les valeurs moyennes annuelles de l'EUE estimées sur toute la période par les modèle CropWat et AquaCrop sont, respectivement, est de l'ordre de 6,24 et 6,37 kg/m³. Il est constaté que la valeur de l'EUE estimée par les modèles CropWat et AquaCrop est plus élevée pour l'année 2008 et plus baisse pour l'année 2001. Ceci est expliqué par les quantités de pluie reçus durant la saison de culture (février - juin) qui sont, respectivement, 293,50 (2008) et 52 mm (2001).

Plusieurs paramètres peuvent affecter l'EUE, notamment, la disponibilité de l'eau, l'interaction avec d'autres facteurs, tels que le cultivar, la gestion agronomique ou les caractéristiques du sol, peut également affecter cette efficacité. À cet égard, Nagaz et al. (2007) ont indiqué que l'EUE variait de 6 à 14 kg/m³ pour les pommes de terre plantées en automne, en hiver et au printemps.

Wright et Stark (1990) ont remarqué que l'EUE des cultures de pommes de terre variait entre 5,4 et 12,0 kg/m³ en fonction de la région, de la gestion de l'irrigation et de la quantité d'engrais appliquée. Fabeiro et al. (2001) ont signalé que les valeurs de l'EUE des cultures de pommes de terre en Espagne se situaient entre 6,3 et 8,6 kg/m³, tandis que Ünlü et al. (2006) ont fait état de valeurs comprises entre 4,8 et 7,4 kg/m³, en fonction à la fois de la méthode d'irrigation et du niveau d'azote.

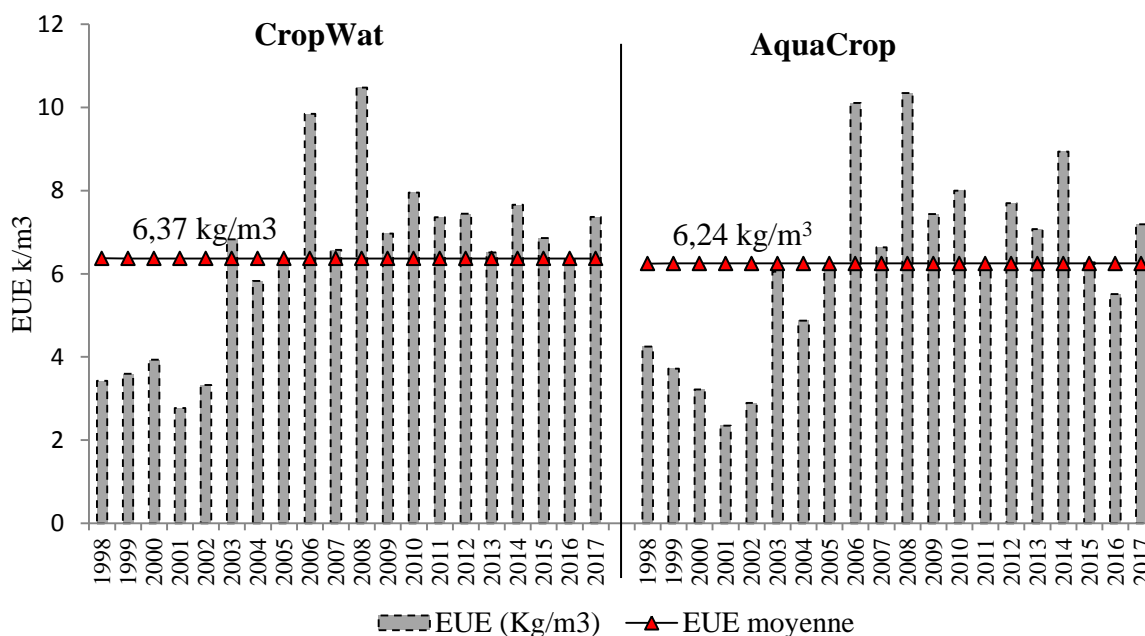


Figure 25. Efficacité d'utilisation de l'eau pour la culture de la pomme de terre estimée par le modèle CropWat et AquaCrop

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 et AquaCrop de la FAO. L'évapotranspiration moyenne annuelle de référence (ET_o) pour la région de Tiaret a été estimée à 947,47 mm. Celles correspondantes à la saison de culture pour la tomate et la pomme de terre sont, respectivement, de l'ordre de 434,11 et 381,68 mm.

Pour l'ensemble du cycle de développement de la culture de la tomate et de la pomme de terre, les besoins en eau d'irrigation (BEI) ont atteint, respectivement, 351,82 et 395,64 mm. Par contre les besoins en eau de ces cultures (ET_c), sont respectivement, 418 et 523,82 mm. Les valeurs moyennes de ces paramètres, ET_c et BEI, fluctuent tout au long du cycle de développement de ces cultures 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 de ces cultures dans les milieux semi-arides.

Ces résultats peuvent être utilisés pour une utilisation plus efficace de l'eau et pour optimiser la production de la tomate et de la pomme de terre 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 AquaCrop et CropWat fournisse des estimations raisonnables du ET_c et BEI, pour plus des résultats fiables ; elles doivent être validées 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.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdel-Fattah G. M., Baka A. M. Z., 2000. The effect of benomyl on growth and ultrastructure of two isolates of *Phytophthora infestans* from Egypt. *Microbiol. Res.* 155,243-248.
- Agricultural Crops. ASA-CSSA-SSSA Pub., Agron. Monog. N. 30, WI, pp. 859-888.
- Agrios G., 2005. *Plant pathology*. 5th ed. Elsevier Academic Press. 922 p
- Ait Ouada M., Bouznad Z., Kedad A., Mokabli A., Siafa A. Yahiaoui S., 2008. Principaux ravageurs et maladies de la pomme de terre : Agents responsables, dégâts, conditions de développement et méthodes de lutte. Journée d'étude sur la filière pomme de terre : Situation actuelle et perspectives. I.N.A. El Harrach, le 18 Juin 2008, Alger.
- Ait. A., 1993, conduite e traitements hydriques différenciés d'une culture de poivron.54p
- Allen R, Pereira LS, Raes D. et Smith, M, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. In: FAO Irrigation and Drainage Paper N. 56, Rome, Italy. 300pp.
- Amrar S., 2008. La pomme de terre : biologie et physiologie. Année internationale de la pomme de terre. *Agriculture & développement*, n° 8. INVA, Alger. p: 11-12.
- Andrivon D., Lebreton L., 1997. Mildiou de la pomme de terre, ou en sommes-nous après 150 ans ? *Phytoma*, 494 (Mai 1997) p: 24-27.
- Aylor D. E., Schmale D. G., Shields E. J., Newcombb M., Nappo C. J., 2010. Tracking the potato late blight pathogen in the atmosphere using unmanned aerial vehicles and Lagrangian modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151: 251–260.
- Badr M.A., Abou Hussein, S.D., El-Tohamy, W.A., Gruda, N., 2010. Efficiency of subsurface drip irrigation for potato production under different dry stress conditions. *Gesunde Pflanzen*. 62, 63-70.
- Badr M.A., El-Tohamy, W.A., Zaghoul, A.M., 2012. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region. *Agric. Water Manage.* 110, 9-15.
- Bellahcene M., Rekkad F. Z., Guinaoui Y., Belabid L., 2009. Caractérisation de *Phytophthora infestans* (Mont.), agent causal du mildiou de la pomme de terre dans le nordouest d'Algérie. Colloque international sur la gestion des risques phytosanitaires
- Belouz. K., 2007, Simulation du bilan hydrique et des rendements de la culture du blé dur par le modèle Pilote. Institut National agronomique EL Harrach – ALGER p72.
- Beninal L., 2011. Diversité génétique de *Phytophthora infestans* agent du mildiou de la pomme de terre en Algérie. Mémoire de Magistère. ENSA. El harrach. Alger. 92 p.

Références bibliographiques

- Beninal L., Corbière R., Kedad A., Andrivon D., Bouznad Z. 2008. A2 mating type, metalaxyl resistance and complex virulence profiles: common features in some *Phytophthora infestans* isolates from Algeria. 11 th Euroblight Workshop, Hamar, Norway. 28-31 October 2008 : 237- 241.
- Bergeron. D, 2005, Mieux irrigué avec les tensiomètres. Journées horticoles de SaintRémi 2005.
- Blancard D., Latterot H., Marchaud G., Cadresse T., 2009. Les maladies de la tomate : identifier connaître et maîtriser. Ed. Quae, Paris. 679p. Boullard B., 1997. Dictionnaire : plante et champignon. Ed De Boeck Secundai. 875p.
- Bourke A., 1993. The Visitation of God: the potato and the great Irish famine.
- Brent K.J., Hollomon D.W., 2007. Fungicide resistance in crop pathogens: How can it be managed? FRAC Monograph No. 1. 2nd Rev. Ed. Fungicide Resistance Action Committee, Crop life International, Brussels.
- Brophy T. F., Laing M. D., 1992. Screening of fungicides for the control of downy mildew on container-grown cabbage seedlings. *Crop Protection*, 11 : 160 – 164.
- Bruck R. I., Fry W. E., Apple A. E., 1980. Effect of metalaxyl, an acylalanine fungicide, on developmental stages of *Phytophthora infestans*. *Phytopathology*, 70: 597–
- Brurberg M. B., Elameen A., Le V.H., Nærstad R., Hermansen A., Lehtinen A., Hannukkala A., Nielsen B., Hansen J., Andersson B., Yuen J., 2011. Genetic analysis of *Phytophthora infestans* populations in the NordicEuropean countries reveals high genetic
- Chol. P., Tron. G., 2000, La Tensimétrie pour piloter les irrigations. 95, 96, 97,100 p.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H. (1979). Yield Response to Water. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33, FAO, Rome, Italy, 193 pp
- Ducroq, M., 1990, Les bases de l'irrigation. 117p
- Elbersen et al, 2004. Switchgrass as an alternative energy crop,
- Elbersen H.W. et al. 2002, Switchgrass variety choice in Europe in Final Report " Switchgrass"
- Fabeiro, C., Martin de Santa Olalla, F., de Juan, J.A., 2001. Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agric. Water Manage.* 48, 255-266.
- FAO, 2011. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Managing systems at risk. *Synthesis Report*, Rome: FAO.
- Filali F., 2003, Bilan hydrique à la parcelle. Pilotage d'un essai d'irrigation par le logiciel Pilote dans ses versions 1.2 et 1.3 utilisant respectivement le Kc et le LAI, Thèse magister, 167p.

Références bibliographiques

- Hassanpanah, D., 2010. Evaluation of potato cultivars for resistance against water deficit stress under in vivo conditions. *Potato Res.* 5, 383-392.
- Hillel. D., 1980, L'eau et le sol, Principes et processus physiques, 294p.
- <http://www.aps.dz/economie/76268-pres-de-70-de-la-consommation-d-eau-accapares-par-l-agriculture>
- Langlois Fabien, 2006. Influence de la variabilité de la pluie sur la production agricole dans le bassin de la Volta – Exemple du Maïs. Rapport Master 1ère année Biologie, Géosciences Agronomie et Environnement. Univ. Montpellier 2, 51p.
- Lidea, 2007. Fiche culture Switchgrass.
- Marrakech, Maroc, 9-11 Novembre 2009. Benton J., 2007. Tomato plant culture : In the field, Greenhouse and home garden. 2nd Edition CRS Press, Londre, 399p.
- Nagaz, K., Masmoudi, M.M., Mechlia, N.B., 2007. Soil salinity and yield of drip-irrigated potato under different irrigation regimes with saline water in arid conditions of southern Tunisia. *J. Agron.* 6, 324-330.
- Press, Dublin.
Regix (2006 – 2007). Rapports de résultats d'essais du réseau.
- Ünlü, M., Kanber, R., Senyigit, U., Onaran, H., Diker, K., 2006. Trickle and sprinkler irrigation of potato (*Solanum tuberosum* L.) in the Middle Anatolian Region in Turkey. *Agric. Water Manage.* 79, 43-71.
- Van Halsema G.E. and Vincent L., 2012. Efficiency and productivity terms for water management: a matter of contextual relativism *versus* general absolutism". *Agricultural Water Management*, 108: 9-15.
- Wright, J.L., Stark, J.C., 1990. Potato. In: Stewart, B.A., Neilsen, D.R. (Eds.), *Irrigation of variability*. *Fungal Biol.* 115 : 335-342.