

REPUBLIQUE 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 de biotechnologie



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : science de la nature et de la vie

Domaine : sciences Agronomiques

Spécialité : eau et environnement

Thème

**Détermination des besoins en eau dans la région d'Alger
pour deux périodes
par le model Aquacrop**

Présenté par : Hamadi yasmine

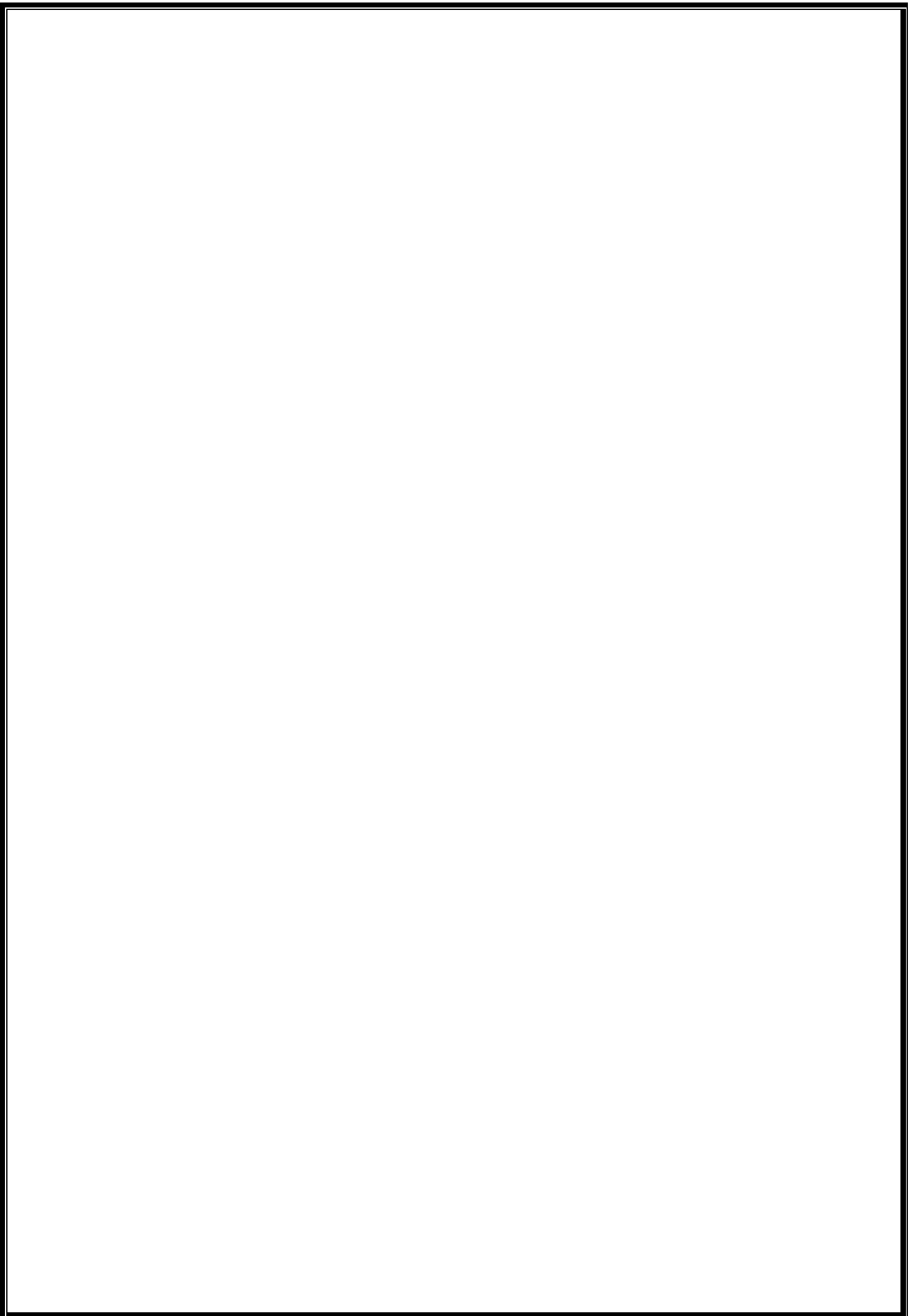
Jury

Président : Zella L. Professeur (USDB).

Examinatrice : Smadhi D. Maître de recherche 'A' (INRAA).

Promoteur : Amirouche M. MAA (ENSA).

Année Universitaire 2017/2018



Remerciements

Je voudrais remercier tout d'abord, Dieu, pour être mon meilleur confident et pour me permettre de réaliser mes rêves. Merci pour me guider toujours avec moi.

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Madame **DALILA SMADHI** directrice de laboratoire bioclimatologie de l'INRA, et mon promoteur **MOUHOUB AMIROCHE**. Je les remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, et le premier d'entre eux le professeur **ZELLA**, et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.*

Je tiens ensuite à remercier mes très chers parents pour le soutien inconditionnel qu'ils m'ont apporté. Merci pour le soutien financier, moral, psychologique et matériel. Si je suis ici aujourd'hui, c'est grâce à vous!

*Je remercie mes frères **KAMEL**, **YOUNES** et **RAFIK**, et ma sœur **NAJET** qui ont toujours été là pour moi.*

Enfin, je remercie tous mes Ami(e)s que j'aime tant, Pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement. À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace

Je dédie ce travail à toutes les personnes qui me sont chères :

Mes parents, mes frères, et ma sœur Najete

Mes grands-parents, mes très cher cousines : Samia, Marwa,

Djahida, Chahra et Fatima et toute ma grande famille.

Mes enseignants depuis le primaire, au lycée et à ceux de

l'université

Ma très chère Zineb, et tous mes amis d'enfance.

Mes chères copines de l'université avec qui j'ai partagé ces cinq

dernières années : «Ilham, Farah, Khaira, Akila, Baya, Sara,

Khadija..... »

A tous mes amis de la promotion d'option EAU ET

ENVIRONNEMENT

Et à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin

pour la réalisation de ce travail.

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Résumé

Introduction

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

I. Climat.....	1
1. Définition.....	1
1.1. Précipitation.....	1
1.2. La température.....	1
1.3. Le vent.....	2
1.4. L'humidité de l'air.....	2
1.5. Le rayonnement solaire.....	2
2. Les besoins en eau des cultures	4
2.1. Définition.....	4
2.2. Méthode pratique du calcul des besoins en eau des cultures.....	4
2.2.1.1. Les différents aspects théoriques de l'évapotranspiration.....	5
2.2.1.2. Facteurs influençant sur l'évapotranspiration.....	5
2.2.1.3. Mesure et estimation de l'évapotranspiration.....	5
2-2-2-Le coefficient cultural (Kc).....	7
2-2-3-Les besoins en eau d'irrigation.....	8

2.2.3.1. Détermination des composantes du bilan.....	9
II. Généralités sur les cultures	10
II.1. La culture de la tomate	10
1.1. Historique et origine de la tomate.....	10
1.2. Description botanique.....	10
1.3. Description de la morphologique.....	10
1.3. Exigences de la culture de la tomate	11
1.3.1. Les exigences climatiques	11
1.3.2. Les exigences édaphiques	12
1.4. Cycle de développement de la plante.....	13
1.6. Importance économique	13
1.6.1. Dans le monde.....	13
1.6.2. En Algérie.....	15
II.2 LA CULTURE DE LA POMME DE TERRE	17
2.1. Historique et origine de la pomme de terre.....	17
2.2. Description botanique.....	17
2.3. Description morphologique.....	18
2.4. Cycle de développement de la pomme de terre.....	19
2.5. Ecologie de la pomme de terre.....	19
2.5.1. Exigences climatiques.....	19
2.5.2. Exigences édaphiques.....	20

2. 6. Importance économique	20
2.6.1. Dans le monde.....	20
2.6.2.En Algérie.....	21
III.Présentation de l’outil de simulatio.....	24
1.Description du modèle.....	26
2-Les caractéristiques du model.....	26
3. Applications.....	26
4.Architecture du modèle.....	27

Chapitre II : matériel et méthodes

1.Le choix de la zone d’étude.....	29
2.Situation géographique.....	29
3.Relief.....	29
4. Le sol.....	30
5.Le climat.....	30
6. Ressources hydrique.....	31
7. Evolution des productions agricoles.....	32
8. La filière des maraichères en Alger.....	33
9. L’évapotranspiration de référence.....	33
10. Inventaire des données.....	34
11. Besoins en eau.....	34

Chapitre III : résultats et Discussions

I. Résultats des traitements statistiques des séries de données	37
1. Variations des pluviométriques.....	37
2. Variations de la température de l'air.....	39
3. Diagramme ombrothermique de Gaussen.....	41
4. Variations de l'humidité relative de l'air.....	43
5. Variation de vent.....	44
6. Variation de l'insolation.....	45
II. Résultats de la simulation	46
1. Estimation de l'évapotranspiration de référence selon le model Aquacrop.....	46
2. Estimation du besoin en eau de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop.....	46
3. Estimation du besoin d'irrigation de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop.....	48
4. Estimation de la transpiration de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop.....	50
5. Estimation de la biomasse de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop.....	52
6. Estimation de la productivité de l'eau de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop.....	52
7. Estimation du rendement de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop.....	53
8. Estimation des besoins en eau de la tomate selon le model Aquacrop avec un scénario sur les changements climatiques.....	54

Conclusion

Références bibliographiques

RESUME

La maîtrise de la gestion de l'eau pour une agriculture durable dans la wilaya d'Alger nécessite l'utilisation d'outils d'aide à la décision.

L'objectif de l'étude est estimé les besoins en eau de la pomme de terre et la tomate pour deux périodes déférente, l'une sèche et l'autre humide, à l'aide d'un nouveau logiciel qui est Aquacrop.

AquaCrop est un outil de bilan d'eau (développé par la FAO) qui permet de gérer l'eau de manière efficiente en irrigation, d'estimer les rendements et d'élaborer des calendriers d'irrigation au niveau de la parcelle. Après introduction les données climatiques, culturelles, de sol, et les données de gestion, nous avons déterminé l'évapotranspiration, puis les besoins en eau, les besoins d'irrigation, la biomasse et le rendement pour chaque culture.

Les résultats obtenu montre que le besoin en eau de la pomme de terre et la tomate est plus important durant la décennie 2010/2017 qu'en décennie 2000/2009, avec 440,25 mm et 410 mm respectivement pour la pomme de terre, tandis que pour la tomate 747,8mm et 689,7mm respectivement.

Par ailleurs, notre étude a montré que parmi les modèles de l'estimation de ETM, le model Aquacrop donne les meilleurs résultats.

Mots clé : besoin en eau ; aquacrop ; productivité de l'eau ; pomme de terre et tomate ; période sèche.

SUMMARY

The control of water management for sustainable agriculture in the wilaya of Algiers requires the use of decision support tools.

The objective of the study is to estimate the water requirements of potato and tomato for two periods of deference, one dry and the other wet, using a new software that is Aquacrop.

AquaCrop is a water balance tool (developed by FAO) that can efficiently manage water in irrigation, estimate yields, and develop irrigation schedules at the plot level. After introducing climate, crop, soil, and management data, we determined evapotranspiration, followed by water requirements, irrigation requirements, biomass, and yield for each crop.

The results obtained show that the water requirement for potatoes and tomatoes is greater during the 2010/2017 decade than in the 2000-2009 decade, with 440.25 mm and 410 mm respectively for the potato, while only for tomato 747.8mm and 689.7mm respectively.

In addition, our study showed that among the models of the ETM estimation, the Aquacrop model gives the best results.

Key words: water requirement; aquacrop; water productivity; potato and tomato; dry period.

ملخص

تتطلب السيطرة على إدارة المياه للزراعة المستدامة في ولاية الجزائر استخدام أدوات دعم القرار. الهدف من هذه الدراسة هو تقدير الاحتياجات المائية للبطاطا والطماطم لفترتين من الإذعان، واحدة جافة والأخرى رطبة، باستخدام برنامج جديد هو Aquacrop.

AquaCrop هي أداة توازن مياه (طورتها منظمة الأغذية والزراعة) يمكنها إدارة المياه بفعالية في الري وتقدير الغلة وتطوير جداول الري على مستوى الأرض. بعد إدخال بيانات المناخ والمحاصيل والتربة والإدارة، حددنا التبخر، متبوعاً بمتطلبات المياه ومتطلبات الري والكتلة الحيوية والعائد لكل محصول.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن متطلبات المياه الخاصة بالبطاطا والطماطم (البندورة) أكبر خلال العقد 2017/2010 مقارنة بالعقد 2009-2000، مع 440.25 ملم و410 ملم على التوالي للبطاطس، بينما فقط للطماطم 747.8 ملم و689.7 ملم على التوالي.

بالإضافة إلى ذلك، أظهرت دراستنا أنه من بين نماذج تقييم ETM، يعطي نموذج Aquacrop أفضل النتائج.

الكلمات المفتاحية: متطلبات المياه AquaCrop. إنتاجية المياه البطاطا والطماطم. فترة الجفاف.

Liste des figures

Figure 1 : Courbe de coefficients culturaux et définition des phases.

Figure 2: la superficie et la production mondiale de la pomme de terre (1996-2017).

Figure 3: Les premiers pays producteurs de tomate en 2016.

Figure 4 : Evolution de la superficie et le rendement de la tomate en Algérie (2000-2016).

Figure 5: Principales wilayas productrices de la tomate en Algérie en 2016.

Figure 6: l'évolution de la production et la superficie mondiale de la pomme de terre (1996-2017).

Figure 7: La production mondiale de la pomme de terre en 2016.

Figure 8: Evolution la superficie et le rendement de la pomme de terre en Algérie (2000-2016).

Figure 9 : Les principales wilayas productrices de pomme de terre pour l'année 2016.

Figure 10: Organigramme d'AquaCrop indiquant les principales composantes de la relation sol-eau-plante.

Figure 11: carte géographique de la wilaya d'Alger.

Figure 12 : Etages bioclimatiques de la zone d'étude (Nedjraoui et Bedrani, 2008).

Figure13: carte géographique des ressources en eaux souterraines de la région d'Alger.

Figure 14: les barrages alimentés la wilaya d'Alger.

Figure 15: répartition des principaux produits végétaux dans la wilaya d'Alger.

Figure 16 : Variation interannuelle des précipitations (1970-2017).

Figure 17 : variation mensuelle des précipitations.

Figure 18 : variation saisonnière des précipitations (1970-2017).

Figure 19: Variations interannuelles de la température maximale de l'air (1970-2017).

Figure 20: Variations interannuelles de la température minimale de l'air (1970-2017).

Figure 21 : variation mensuelle des températures max et min de l'air.

Figure 22 : variation saisonnière des températures de l'air.

Figure 23: Diagramme ombrothermique de Gaussen (1970-1980).

Figure 24: Diagramme ombrothermique de Gaussen (1980-1990).

Figure 25: Diagramme ombrothermique de Gaussen (1990-2000).

Figure 26: Diagramme ombrothermique de Gaussen (2000-2010).

Figure 27: Diagramme ombrothermique de Gaussen (2010-2017).

Figure 28 : variation interannuelle de l'humidité de l'air (1970-2017).

Figure 29 : variation mensuelle de l'humidité de l'air.

Figure 30 : variation interannuelle de la vitesse de vent (1970-2017).

Figure 31 : variation interannuelle de la durée de l'insolation (1970-2017).

Figure 32 : variation mensuelle de la durée de l'insolation (1970-2017).

Figure 33 : variation interannuelle de l'évapotranspiration.

Figure 34 : Estimation du besoin en eau de la pomme de terre et la tomate.

Figure 35 : Estimation mensuelle des besoins en eau de la pomme de terre.

Figure 36 A : Estimation du besoin d'irrigation de la pomme de terre.

Figure 37 B : Estimation du besoin d'irrigation de la tomate.

Figure 38 : Estimation des besoins d'irrigation mensuelle de la pomme de terre.

Figure 39 : Estimation des besoins d'irrigation mensuelle de la tomate.

Figure 40 A : variation de la transpiration de la pomme de terre

Figure 40 B : variation de la transpiration de la tomate

Figure 41 : évolution de la biomasse de pomme de terre et tomate.

Figure 42 A : variation de la productivité de l'eau de la pomme de terre.

Figure 42 B : variation de la productivité de l'eau de la tomate

Figure 43 A : Comparaison du rendement simulée et du rendement observée dans la pomme de terre

Figure 43 B : Comparaison du rendement simulée et du rendement observée dans la tomate

Figure 44 : Estimation du besoin en eau de la tomate avec un scénario sur les changements climatiques

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des méthodes de mesure-estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle.

Tableau 2 : Les coefficients culturaux et la hauteur maximale pour différentes cultures.

Tableau 3 : Classification botanique de tomate.

Tableau 4 : Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate.

Tableau 5: Classification botanique de la pomme de terre.

Tableau 6: les principales grandes catégories de modèles de culture.

Tableau 7: caractéristiques culturale introduites dans le logiciel Aquacrop.

Tableau 8: caractéristiques de sol introduit dans le logiciel Aquacrop.

Liste des abréviations

°C : degré Celsius

cm : centimètre

E : évaporation

ET : évapotranspiration

ha : hectare

HI : indice de récolte

kc : coefficient cultural

kcal/m² : kilocalorie par mètre carré

kg : kilogramme

km/h : kilomètre par heure

l/m² : litre par mètre carré

mm : millimètre

mmhos /cm : millimhos par centimètre

P : pluie

Ppm : partie par million

qx : quintaux

T : température

Tmax : température maximal

Tmin : température minimal

Tr : transpiration

WP : productivité de l'eau

W/m² : watt par mètre carré

Introduction

L'agriculture mondiale va devoir relever un défi de taille : doubler la production à l'horizon 2050 pour nourrir les futurs 9 milliards et demi d'humains (FAO, 2013). Aujourd'hui l'agriculture utilise déjà près de 70 % des volumes d'eau douce dans le monde, et les scénarios climatiques aboutissent tous au même constat : la ressource en eau disponible se fera plus rare dans la plupart des régions, en particulier sur le pourtour méditerranéen (diminution des précipitations, modification des saisons, aggravation de l'intensité des épisodes de sécheresse) et le besoin en eau des plantes augmentera avec la hausse des températures.

En Algérie, le problème de l'eau a commencé à se poser avec acuité ces dernières décennies qui sont caractérisée par une sécheresse persistante provoquant la diminution des ressources en eau. Sur le plan pluviométrique, celui-ci se caractérise par l'insuffisance des précipitations et leur irrégularité dans l'espace et dans le temps. Les potentielles en eau connues à ce jour, sont estimées à 11.2millions m³/an, soit 292 m³/an/habitant en 2014.ce qui positionne l'Algérie parmi les pays les plus stressé hydriquement, avec des ressources par habitant très inférieur au seuil de rareté absolue de l'eau (FAO, 2014).

L'eau est une ressource fondamentale pour l'agriculture. Le manque d'apport pluviométrique, récurrent en période estivale, constitue un frein majeur pour la production végétale.

L'irrigation apparaît comme une des solutions de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique ; elle permet de tripler la productivité des terres, et assure aujourd'hui 40 % de la production alimentaire sur seulement 18 % de terres agricoles irriguées (MADR 2016). Elle constitue ainsi un outil incontournable pour la sécurité alimentaire dans des zones arides où l'agriculture pluviale ne fournit pas des productions suffisantes et diversifiées.

Dans le cadre d'une gestion raisonnée de l'irrigation, l'anticipation des besoins en eau des cultures est importante afin de planifier les opérations au champ.

Pour déterminer les besoins en eau des cultures, il faut tenir compte de tous les éléments ci-après : climat, culture, sol, eau disponible dans le sol, fertilité du sol, méthodes et pratiques du sol et d'irrigation.

Les méthodes développées par la FAO pour déterminer les besoins en eau, fondées sur le concept d'évapotranspiration de référence et de coefficients culturaux, ont été pensées comme outil opérationnel et standard de programmation de l'irrigation.

Cette grandeur s'obtient soit par mesure directe, par les appareils de mesure tels que les cases lysimétriques, les bacs..., soit par estimation en cas d'absence des mesures sur terrain, ou par l'utilisation de la modélisation.

En Algérie, la filière pomme de terre et tomate dans tous ses volets semences et consommation occupe aujourd'hui une place stratégique dans la nouvelle politique du renouveau agricole et rural, où sa culture reste parmi les espèces maraîchères, qui occupe une place primordiale tant par l'importance qu'elle occupe dans l'alimentation, les superficies qui lui sont consacrées, l'emploi qu'elle procure que par les volumes financiers qui sont mobilisés annuellement pour sa production locale et/ou son importation (consommation et semence).

La présente recherche vise à effectuer la détermination des besoins en eau de la tomate et la pomme de terre sur la base des données théoriques fournies au logiciel AquaCrop. Ce logiciel, développé par la Food and Agriculture Organisation (FAO), se base sur des paramètres phénologiques et pédologiques en plus des facteurs climatiques pour modéliser la croissance des végétaux. Il est fondé sur le transfert d'eau entre le sol, la plante et l'atmosphère.

Cette étude nous a amené à réaliser 3 chapitres :

Premier chapitre intitulé ; Synthèse bibliographique : ce chapitre est consacré à l'étude bibliographique dans laquelle nous avons synthétisé : le climat et ses facteurs, l'évapotranspiration et illustre certaines méthodes pour le calculer, ainsi les caractéristiques des cultures étudiées.

Deuxième chapitre intitulé ; Matériels et méthodes : il concerne l'aspect méthodologique ou est présente le matériel de base de l'étude à savoir le choix de la zone d'étude ainsi que l'outil utilisée pour la simulation.

Troisième chapitre intitulé ; résultats et interprétation : cette dernière partie traite de l'analyse et de l'interprétation des résultats de l'étude.

I. Climat

1. Définitions

Avant le 20^{ème} siècle, le terme « climat » représentait toute étendue de la surface terrestre caractérisée par des conditions atmosphériques, habituellement, comparables. En 1948, Thornthwaite a défini le climat devant la commission de climatologie de l'OMM, comme « une intégration des facteurs météorologiques et climatiques qui concourent à donner à une région donnée son caractère et son individualité ». **M. Sorre (1943)**, le définit comme « l'ambiance atmosphérique constituée par la série des états de l'atmosphère au-dessus d'un lieu dans leur succession habituelle ». Plus simplement, il s'agit des « fréquences saisonnières des temps qu'il fait » (**Hufty, 2001**).

Le climat est, donc, la synthèse de la succession des conditions atmosphériques dans une région donnée, pendant une longue période (souvent une trentaine d'années). Il est déterminé à l'aide de moyennes établies à partir de mesures statistiques mensuelles et annuelles sur des données atmosphériques locales : températures, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent..., il dépend :

- de la latitude du lieu ;
- de sa circulation atmosphérique ;
- et des conditions de l'environnement.

Pour mieux cerner la question climatique, nous avons exposé quelques définitions de base qui nous donneront une idée sur les différents éléments du climat.

1.1. Les précipitations

Les précipitations, sont toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre...).

La pluviométrie constitue un facteur écologique d'importance fondamentale car elle a une influence très marquée sur l'évapotranspiration « Si l'évaporation du sol est fortement réduite ou supprimée, il en résulte une diminution significative des précipitations » (**Shukla et Minz, 1982; Hall et Sarenije, 1993**).

Quelle que soit la forme de la précipitation, on mesure la quantité d'eau tombée durant un certain laps de temps. On l'exprime généralement soit en millimètres (mm), soit en litres par mètre carré (l/m²).

1.2. Températures

La température est un facteur écologique capital. Elle agit sur la répartition géographique des espèces animales et végétales (**Dreux, 1980**). Elle dépend fondamentalement de la quantité des

rayonnements reçus du soleil, soit directement ou indirectement par l'intermédiaire de la surface de la terre. L'unité internationale de température est le Kelvin (K). Le degré Celsius (°C) est une autre unité très répandue en Europe.

La température représente un facteur important de l'évapotranspiration plus elle est forte, la demande évaporatoire de l'atmosphère augmente. Pour évaporer une lame d'eau de 1 mm d'épaisseur, il faut 590 kcal/m², donc, elle est très importante dans l'évaluation de l'évapotranspiration (**Diop, 2009**).

1.3. Vent

Le vent est un facteur écologique de premier ordre, il présente une action directe sur le végétal (dissémination, destruction, dessèchement...etc.).

D'après **Seltzer (1946)** le vent est l'un des éléments les plus caractéristiques du climat par sa force. Il agit sur le degré de la température et sur la vitesse d'évaporation, il a un pouvoir desséchant. A cet égard (**Henia L., 1993 ; Beltrando et al., 1995**) mentionnent que le vent constitue un facteur favorable à l'évapotranspiration, il intervient par sa vitesse et par ses caractéristiques hygrothermiques.

La vitesse du vent s'exprime soit en mètre par seconde (m/s), soit en kilomètre par heure (km/h)

1.4. Humidité de l'air

Ce paramètre météorologique caractérise le degré d'hygrométrie de l'air et correspond à une possibilité d'évaporation tant que la saturation n'est pas atteinte. L'humidité relative de l'air est révélatrice de son taux de saturation : plus l'air n'a été en contact avec de l'eau, plus il est donc chargé en vapeur d'eau (**Gond et al., 2004 ; Diop., 2009**).

Le taux d'humidité dans l'air dépend de la température, c'est-à-dire de la radiation solaire directe, mais aussi du vent qui renouvelle l'air ambiant, remplaçant l'air saturé d'eau par de l'air sec qui stocke de l'humidité. Aussi, l'évaporation est d'autant plus active que la pression est basse (**Etienne et al, 1970**).

En général, quand on parle de mesure d'humidité, on fait allusion à l'humidité relative exprimée en %.

1.5. Rayonnement solaire

L'insolation est la quantité de rayonnement solaire direct incident par unité de surface horizontale exprimée en heures ainsi. Plus le soleil chauffe directement le sol et plus l'évapotranspiration est élevée (**Diop., 2009**). Son unité est le Watts par mètre carré (W/m²).

Lorsque l'altitude augmente, la couche d'atmosphère à traverser est plus réduite : dans les sites de montagne, l'intensité du rayonnement augmente car les rayons solaires sont moins filtrés. Ainsi, latitude influence la quantité d'énergie reçue.

L'intérêt d'étudier les facteurs climatique et son impact sur l'évapotranspiration est pour prédire le rendement cultural, car ces facteurs agissent d'une façon directe sur les besoins en eau des cultures.

2. Les besoins en eau des cultures

2.1. Définition

Selon la (FAO, 2000) le besoin en eau d'une culture est "la quantité d'eau nécessaire à couvrir les pertes en eau par évaporation (évapotranspiration de la culture) d'une culture saine, cultivée en grande parcelle, sans contraintes du sol (fertilité et humidité), et réalisant son potentiel de production sous les conditions considérées". Cette définition correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture (ETM).

D'un autre côté, (Perrier, 1988) a signalé que lorsque la transpiration atteint après pluie, rosée ou irrigation la valeur maximale, la plante se trouve dans des conditions hydriques très favorables, cette valeur ne se maintient pas longtemps, car très vite la surface ne reste que partiellement mouillée.

D'une manière générale et selon Booher (1974), les besoins en eau d'une culture varient selon le type de culture, la saison de croissance et les conditions climatiques aux diverses phases de cette croissance.

2.2. Méthode pratique du calcul des besoins en eau des cultures

Il faut considérer plusieurs aspects :

- 1-le calcul de l'évapotranspiration.
- 2-le choix d'un coefficient cultural (kc).
- 3-Le calcul des besoins en eau d'irrigation.

2.2.1. Evapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) est une combinaison de deux termes, à savoir, l'évaporation (à partir d'une surface, d'un plan d'eau) et la transpiration des végétaux (à travers les stomates des feuilles). L'évapotranspiration représente, donc, deux processus de transfert d'eau. Le premier est le transfert d'eau dans le continuum « sol-atmosphère » et le deuxième concerne le transfert d'eau dans le continuum « plante-atmosphère » (Lecoeur, 2007).

De plus, l'évapotranspiration est une composante indispensable du bilan de l'eau. L'expression de l'évapotranspiration est la synthèse de tous les éléments du climat, en particulier les températures, la durée de l'insolation, l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent. Aussi, l'évapotranspiration joue un rôle capital pour l'évaluation des aptitudes climatiques d'une région donnée ; elle est considérée comme l'indicateur du développement optimal de la végétation ; elle est à la fois cause et conséquence du climat (**Calanca et al, 2011**) L'évapotranspiration est l'une des composantes du cycle hydrologique les plus difficiles à quantifier du fait de sa complexité dans le système sol-terre-plante. Son estimation est importante pour les programmes d'irrigation, la planification et la gestion des ressources en eau (**Singh et al, 1998**).

2.2.1.1. Les différents aspects théoriques de l'évapotranspiration

➤ **Evapotranspiration potentiel**

L'évapotranspiration d'une prairie ou d'un gazon en pleine croissance (mais non épié), fauché régulièrement, correctement fumé et bien enraciné, sur un sol maintenu à une humidité proche de la capacité de rétention et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique.

Pour **Calanca et Holzkämper (2010)**, l'ETP considérée comme l'indicateur du développement optimal de la végétation et joue un rôle capital pour l'évaluation des aptitudes climatiques d'une région pour l'agriculture. Ce paramètre entrepris par plusieurs climatologues est d'une part favorable pour analyser les besoins en eau des cultures, et d'autre part pour y remédier aux différentes carences au niveau desquelles les plantes sont soumises à l'exemple du stress hydrique (**Dubost ,1992**).

➤ **Evapotranspiration maximale**

C'est la quantité d'eau perdue par une végétation jouissant d'une alimentation hydrique optimale (bonne fertilité du sol, bonne état sanitaire...). Selon **Zella (2015)** l'ETM exprime la demande en eau exercée sur un couvert végétal.

Par ailleurs (**Xanthoulis D., 2010**) mentionne que, l'évapotranspiration maximale varie au cours du développement d'une culture annuelle elle augmente progressivement avec le taux de recouvrement du sol par la plante pour atteindre ETP et diminue à la fin du cycle végétatif. Cette forme d'évapotranspiration (ETM) est utilisée par les agronomes pour déterminer les besoins en eau des plantes.

➤ **Evapotranspiration réelle**

C'est l'évapotranspiration d'un couvert végétal dans des conditions réelles données : l'alimentation en eau de la plante peut être limitée par des contraintes d'ordre physique (suction du sol), chimique (concentration des solutions), biologique (régulation).

Charles (1975) estime qu'ETR est la dose à appliquer dans le temps et dans l'espace au niveau du développement de la plante.

2.2.1.2. Facteurs influençant sur l'évapotranspiration

Selon **Zella (2015)** l'ET dépend conjointement du stock d'eau disponible et la demande climatique en, exprimée par le climat.

De nombreux facteurs géographiques, biologiques climatiques et pédologiques influencent l'évapotranspiration (**Allen et al, 1998 et 2011**) :

- Le sol : par sa composition (texture) et ses capacités de rétention, la réserve utile et humidité du sol.
- La plante, le stade de croissance et maturité de la plante, la hauteur, la profondeur des racines, résistance stomatique.
- La géographique (essentiellement la topographie): l'état de la surface évaporant, l'altitude, la latitude, la proximité de la mer, - orographie (exposition des versants au soleil, aux vents, pentes).
- Le climat: la température de l'air, la température de la surface terrestre, la vitesse et du vent, la durée de l'insolation ou le rayonnement solaire, l'humidité relative de l'air, pression atmosphérique.

2.2.1.3. Mesure et estimation de l'évapotranspiration

L'estimation de la valeur exacte et réelle de l'évapotranspiration reste toujours le but des chercheurs (agronomes, hydrologues, et les ingénieurs hydrauliciens). Plusieurs méthodes ont été utilisés pour calculer ou estimer la valeur de l'ET, Certaines d'entre elles sont plus convenables que d'autres pour des questions de précision ou de coût financier, ou sont particulièrement adaptées à des échelles d'espace et de temps données. Le tableau1 élaboré par **Rana et Katerji (2000)**, résume les méthodes de mesure et de l'estimation de l'évapotranspiration.

Tableau1 : Classification des méthodes de mesure-estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle

	Approches	Méthodes
Mésure de évapotranspiration	Approche hydrologique	Bilan hydrique
		Lysimètre
	Approche micro-météorologique	Bilan d'énergie et rapport de Bowen
		Méthode aérodynamique
		Eddy covariance
	Approche physiologique-végétale	Méthode du flux de Sève
Systèmes de chambres		
Estimation de évapotranspiration	Approche analytique	Méthode de Penman-Monteith
	Approche empirique	Méthode de coefficient cultural (Kc)
		Méthode du bilan hydrique
	Approche de la télédétection	Bilan d'énergie
		Activité physiologique des plantes

(Source : Rana et Katerji., 2000)

Cependant, les mesures directes de l'évapotranspiration peuvent être faites par les méthodes courantes suivantes : Evapotranspiromètre, Les bacs à évaporation, L'évaporomètre Pic.

Parmi les méthodes d'estimation d'évapotranspiration présentées dans le tableau, la formule FAO Penman-Monteith a été proposée par Allen et al (1988)

L'équation de Penman-Monteith détermine l'évapotranspiration d'une culture de référence et fournit des valeurs standardisées de l'évapotranspiration à différentes périodes de l'année et dans différentes régions (Allen, 1998). Elle permet donc de déterminer les pertes en eau effectives des terres arables dues à l'évapotranspiration. L'avantage de cette formule réside dans le fait qu'elle peut être employée dans un contexte de changement climatique.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

Avec :

ET_0 , évapotranspiration de référence (mm/j) ;

T, température de l'air (°C) ;

u_2 , vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol (m/s) ;

Δ , rapport entre la différence de pression de vapeur et la différence de température correspondant ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$) ;

γ , constante psychrométrique ($\gamma \sim 66 \text{ Pa}/^{\circ}\text{K}$) ;

R_n , le rayonnement net à la surface du sol ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{j}$) ;

G , le flux de chaleur du sol ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{j}$) ;

e_s , pression de vapeur (kPa) ;

e_a , pression de vapeur saturante à la température T (kPa).

la méthode de Penman-Monteith-FAO (Allen et al. 1998) intègre la température, l'humidité relative, l'insolation et la vitesse du vent. Celle-ci a été utilisée comme méthode de référence dans notre étude. La FAO en collaboration avec le Comité International d'Irrigation et de Drainage (C.I.I.D), lors d'un colloque à Rome du 28 au 31 mai 1990, ont recommandé la méthode de Penman-Monteith-FAO, avec des paramètres de rugosité et de résistance de surface normalisés, comme moyen de détermination de l'ETP.

2-2-2-Le coefficient cultural (K_c)

Par définition, ce coefficient traduit le rapport entre l'évapotranspiration maximal de la culture à un stade donné et l'ETP.

Sa valeur est largement affectée par la nature de la culture, sa hauteur, sa durée de cycle, et son taux de croissance. La fréquence des pluies ou de l'irrigation au début du cycle de la culture affecte aussi le K_c .

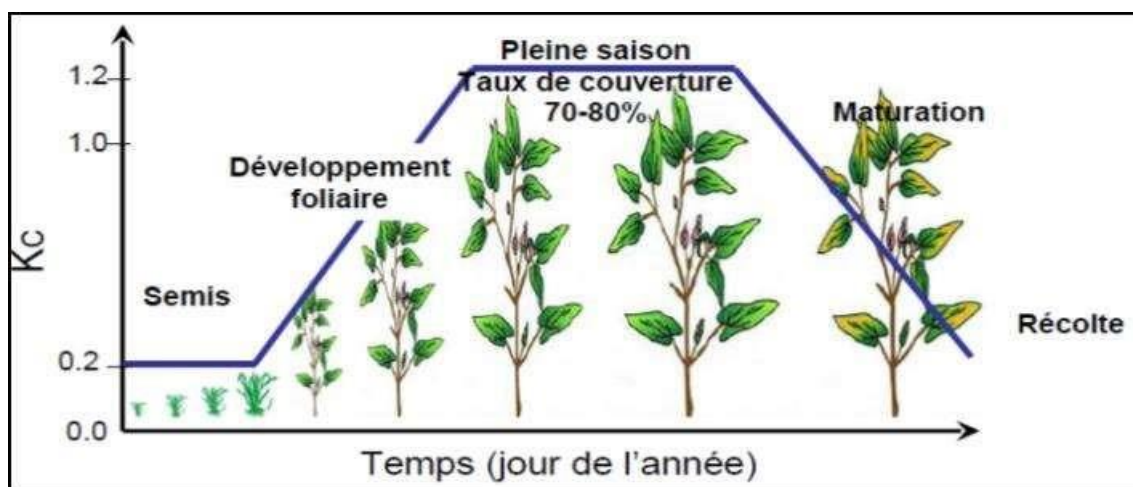


Figure 1 : Courbe de coefficients culturaux et définition des phases (Er-Raki.. S, 2007)

La courbe de kc sur l'ensemble de la période de croissance Elle permet de distinguer les 3 valeurs de kc (initial, mi- saison, et d'arrière-saison). Les valeurs les plus élevées du kc 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**).

Tableau 2 : Les coefficients culturaux et la hauteur maximale pour différentes cultures

Culture	Kc ini	K moy	Kc fin	Hauteur maximale de la culture (en m)
Oignon sec	0,7	1,05	0,75	0,4
Salade	0,7	1	0,95	0,3
Tomate	0,6	1	0,95	0,3
Pomme de terre	0,5	1,15	0,75	0,6
Haricot vert	0,5	1,05	0,9	0,4
Orange	0,7	0,65	0,7	4
Olivier	0,65	0,70	0,70	4-6

Source : Allen et al., 1998

2-2-3-Les besoins 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 déterminé 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**).

L'équation du bilan hydrique, dans son expression la plus complète (**Rana & Katerji, 2000**), s'écrit :

$$P + I + W - ET - R - D = \pm \Delta S_0^f \text{ (mm/s)}$$

Avec :

P, précipitations

I, irrigation

W, remontée capillaire

D, drainage

R, ruissellement

ET, évapotranspiration

ΔS , stock d'eau dans la zone racinaire

2.2.3.1. Détermination des composantes du bilan

Pluies : on comptabilise l'ensemble des précipitations (éventuellement la neige). La rosée n'est pas comptabilisée, elle est négligeable.

Remontée capillaire : de l'eau remonte depuis la partie non exploitée par les racines (sol profond, nappes...). En l'absence de nappe d'eau souterraine, les remontées capillaires sont considérées comme nulles.

Irrigation: maîtrisés par le gestionnaire de l'espace vert, ils viennent compléter les apports naturels.

Consommation : elle est calculée à partir de la demande climatique ETP et du coefficient cultural K_c . Consommation en eau (mm/j) = ETP (mm/j) x K_c

Ruissellement : c'est la perte d'eau en surface par écoulement (fonction de l'état de la surface du sol, de la pente du terrain et de l'intensité des apports d'eau).

Drainage : c'est la perte d'eau en profondeur s'il y a trop d'eau dans le sol. En pratique : le drainage est difficilement mesurable surtout en espace vert où les sols sont plutôt bien drainés. Ce paramètre est pris en compte dans le bilan en limitant la capacité du réservoir : les apports en excès sont considérés comme perdus.

II. Généralités sur les cultures

II.1. La culture de la tomate

1.1. Historique et origine de la tomate

La tomate (*SolanumLycopersicum*) est d'origine américaine, en particulier d'Amérique centrale et Amérique de sud (Mexique, Pérou, Bolivie...) ; même aujourd'hui dans les régions montagneuses de ces pays, on trouve la plus grande diversité de formes sauvage et culturelles de la tomate (Kolev ,1976).

Selon (Shankara et al ,2005) la tomate fut domestiquée au Mexique, puis introduite en Europe en 1544. De là sa culture s'est propagée en Asie de sud et de l'est, en Afrique et en moyen Orient ;

La tomate arriva d'abord en Espagne, puis très vite, elle parvient en Italie et gagna le reste de l'Europe (El fadl et Chtaina ,2010)

D'après Chaux (1972), la tomate est le légume le plus consommé dans le monde.

1.2. Description botanique

La tomate (*SolanumLycopersicum*) est une plante de la famille des solanacées, comme la pomme de terre qui a la même origine géographique (Jean-Marie, 2007).

Selon Dominique et al (2009), la tomate cultivée est une espèce diploïde avec $2n=24$ chromosomes, chez laquelle il existe de très nombreux mutants mono génétiques dont certains sont très important pour la sélection.

Elles appartiennent à (tableau 3):

Tableau 3 : Classification botanique de tomate

Embranchement	<i>Phanérogames</i>
Sous embranchement	<i>Spermatophytes</i>
Ordre	<i>Polemoniales</i>
Famille	<i>Solanacées</i>
Genre	<i>Lycopersicum</i>
Espèce	<i>Solanum Lycopersicum</i>

Source : Dominique et al (2009)

1.3. Description de la morphologique

La tomate est une plante vivace dans son milieu d'origine mais en agriculture elle est considérée comme une espèce annuelle à cycle court. Il existe 2 types de croissance du plant :

-Des plants à croissance déterminée ou l'axe principale s'arrête de croître après un certain nombre de bouquets floraux.

-Des plants à croissance indéterminée ou le bourgeon terminal poursuit sa croissance en donnant un bouquet floral chaque 3 ou 4 feuille jusqu'à la fin de cycle de la plante. (**Shankara et al, 2005**)

➤ **Le système racinaire**

La tomate a un racinaire important. De nombreuses racines primaires, secondaires et tertiaires prennent sur un pivot puissant. Les racines nourricières se rencontrent entre 25 et 35 cm de profondeur (**Shankara et al, 2005**).

➤ **La tige**

La tige principale constitue un puissant pivot sur lequel se développent des ramifications secondaire et tertiaire pour donner au final un aspect buissonnant. Les tiges sont herbacées presque ligneuses, de couleur verte pourvus de poils blanchâtres et elles portent les feuilles, fleurs et fruits.

➤ **La feuille**

Les feuilles sont disposées en spirale, elles sont de 15 à 50 cm de long et 10 à 30 cm de large. Les folioles sont ovées à oblongues, couvertes de poils glandulaires. Les grandes folioles sont parfois pennatifides à la base. Le pétiole mesure entre 3 et 6 cm (**Shankara et al, 2005**).

➤ **La fleur**

Les fleurs, petites jaunes, en forme d'étoile, sont regroupées sur un même pédoncule en bouquet lâche de trois à huit fleurs. Ces bouquets apparaissent en général régulièrement sur la tige chaque fois que la plante a émis trois feuilles (**El fadl et Chtaina, 2010**).

➤ **Le fruit**

Les fruits sont traditionnellement sphériques et rouge, ils peuvent être de diverses tailles, couleurs et formes. Il existe ainsi variétés blanches, jaunes, oranges ou noir violace (**Jeans Marie, 2007**).

1.3. Exigences de la culture de la tomate

1.3.1. Les exigences climatiques

➤ **Température**

La température est le facteur le plus déterminant dans la production de la tomate, elle demande un climat relativement frais et sec pour fournir une récolte abondante et de qualité. La température optimale pour la plupart des variétés se situe entre 21 et 24°C. (**Skiredj et al, 2005**).

Tableau 04 : Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate :

PHASE	Température (C°)		
	Min	Intervalle optimale	Max
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	10	20-24	30

Source :(Shankara, 2005)

➤ L'eau et l'humidité

Si les réserves en eau disponibles sont suffisantes pour cultiver la tomate. Le stress causé par une carence en eau et les longues périodes arides fait tomber les bourgeons et les fleurs (**Chaux, 1972**).

Par contre, lorsque averses sont très intenses et l'humidité est très élevée, la formation des moisissures et la pourriture des fruits seront plus importants. Les temps nuageux ralentissent le murissage des tomates. Cependant, des cultivars adaptés sont disponibles (**Shankara , 2005**).

➤ La lumière

La lumière est un facteur écologique essentiel pour la tomate, elle intervient dans des nombreux phénomènes physiologiques, notamment la photosynthèse (**Chibane, 1999**).

1.3.2. Les exigences édaphiques

➤ Le sol

Elle préfère les terres limoneuses profondes et bien drainées. La couche superficielle du terrain doit être perméable. Une profondeur de sol de 15 à 20 cm est favorable à la bonne croissance d'une culture saine (**Skiredj, 2006**).

➤ Le PH

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

➤ La salinité

La culture de la tomate tolère une conductivité électrique (CE) de l'ordre de 3à 4.5 mmohs /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).

1.4. Cycle de développement de la plante

La durée du cycle végétatif complet de la tomate est de 4 à 6 mois après le semis (Benton, 2008) définie par les stades suivants :

- ❖ **La germination** : A température ambiante comprise entre 18 et 24°C, la levée s'effectue au bout de 6 à 8 jours. Au-dessus du sol apparaissent la tigelle et deux feuilles cotylédonaires simples et opposées. Dans le sol, la racine possède un manchon de poils absorbants bien visibles (Naika et al, 2005).
- ❖ **La croissance végétative** : La racine s'allonge et prend l'aspect d'un filament blanchâtre sur lequel apparaissent des racines secondaires. Les deux premières vraies feuilles découpées apparaissent vers le 11^{ème} jour. Elles ne deviennent bien développées que vers le 20^{ème} jour. Le jeune plant est de 15 à 20 cm de hauteur, idéal pour le repiquage et la croissance progresse (Naika et al, 2005).
- ❖ **La floraison** : Environ deux mois et demi après le semis, la première inflorescence apparaît. Les autres inflorescences vont apparaître au-dessus de la première avec, entre chaque inflorescence, un nombre variable de feuilles (Benton, 1999).
- ❖ **La fructification/ maturation** : Elle débute durant la phase de floraison. Elle commence par la nouaison des fleurs de l'inflorescence de base et se poursuit par les inflorescences supérieures au fur et à mesure de l'apparition des inflorescences et de la fécondation des fleurs. Les fruits se développent, grossissent et après avoir atteint leur taille définitive, ils commencent à perdre leur coloration verte au profit du jaune puis au rouge de plus en plus accentué (Naika et al, 2005).

1.6. Importance économique

1.6.1. Dans le monde

La tomate est une culture importante de l'économie mondiale. Elle représente l'un des légumes les plus consommés car elle fournit des nutriments essentiels dans l'alimentation humaine (Razdan et Mattoo, 2007). Selon les données de la FAOSTAT 2017, la production mondiale de tomate a battu des records au cours de l'année 2016 avec 177 042 000 T. ce volume montre

une progression de 29.08% en 10 ans. la superficie consacrée était de 4 782 754 hectares, ce qui représente un rendement moyen par mètre carré de 3.7 kilos de tomate.

D'après la figure 2, la superficie et la production de la tomate sont en augmentation continue, durant les deux dernières décennies où la moyenne d'augmentation annuelle est d'environ 20 %.

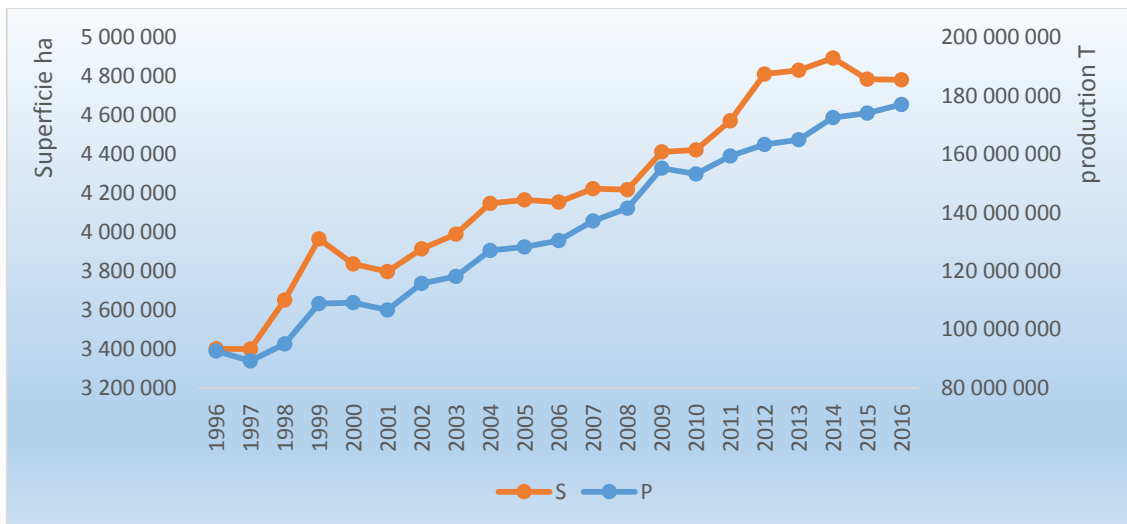


Figure 2: la superficie et la production mondiale de la pomme de terre (1996-2017)

Source : FAOSTAT, 2017

La figure 3 donne la production en tonne des 18 premiers pays producteurs (FAO STAT, 2017)

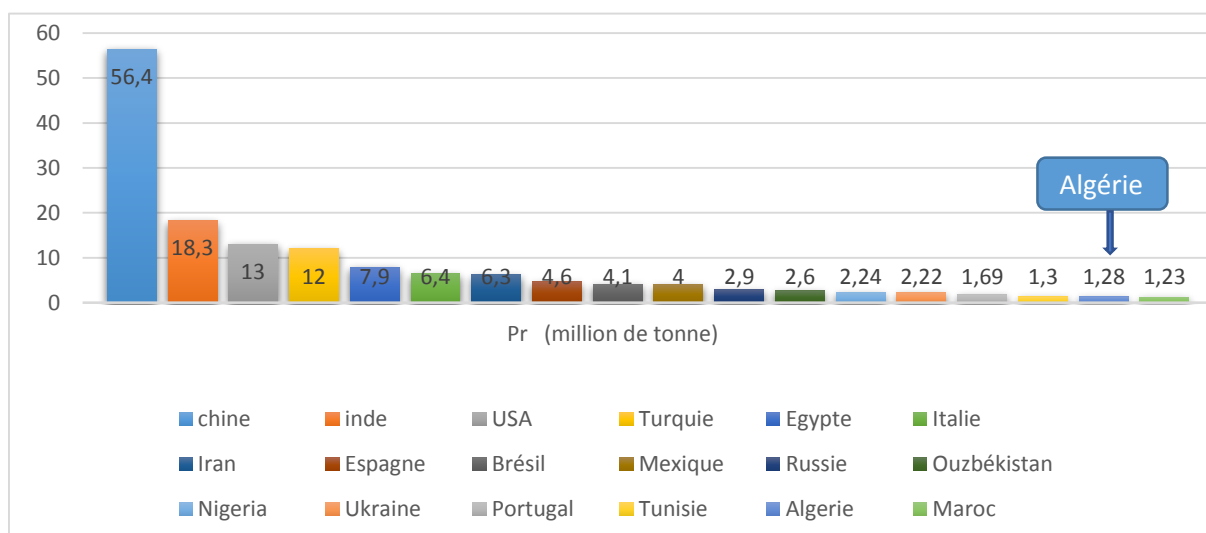


Figure 3: Les premiers pays producteur de tomate en 2016. (FAO STAT, 2017)

Selon la figure 3, les deux premiers pays producteurs mondiaux sont la Chine avec 56.4 Million de tonne soit 31,81% du total mondial. Suivie Inde avec 18.3 million de tonnes de tomates produites chaque année, USA occupe le troisième rang mondial avec 13 million de tonnes. De nombreux pays tels que l’Egypte, la Turquie, l’Iran, le Brésil, l’Italie l’Espagne et Mexique produisent également chaque année plus de quatre millions de tonnes de tomates. Enfin, certains pays du Maghreb tels que la Tunisie, Algérie et le Maroc occupent des rangs importants dans le classement mondial. Enfin, la production de tomate peut être un fort atout économique dont peuvent bénéficier les pays.

1.6.2. En Algérie

En Algérie, la tomate est cultivée selon deux modes de production à savoir en culture maraichère et en culture industrielle. La superficie totale réservée est de 43 990 ha représentée par 51.2 % pour la tomate maraichère donnant une production moyenne de 12 millions de quintaux et 48.7 % pour la tomate industrielle donnant une production moyenne de 12 millions de quintaux. (MADR, 2017).

Selon les statistiques du ministère de l’agriculture (MADR, 2016). On constate une production de tomate en évolution croissante mais si on va comparer l’évolution des superficies avec les rendements (figure 4), on constate qu’il y a une augmentation du rendement face à une diminution des surfaces cultivées en 2015. Cette situation peut être expliquée par l’importance des rendements des cultures de tomate sous serre dans les zones à forte potentielle de production (Biskra, un rendement moyen de 1399.5 qx/ha avec une superficie de 2253 ha de tomate sous serre).

La consommation annuelle de la tomate en Algérie dépasse 27 Kg/habitant en 2016 (FAOSTAT, 2017).

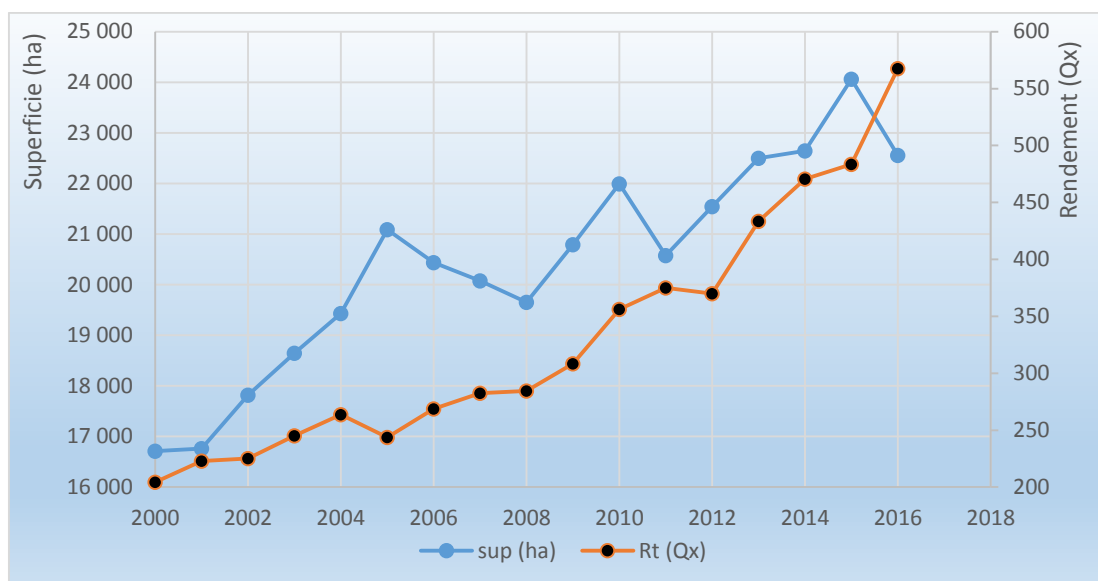


Figure 4 : Evolution de la superficie et le rendement de la tomate en Algérie (2000-2016)

➤ **Les principales wilayas productrices de la tomate en Alger**

Parmi les grandes wilayas productrices (figure5), nous citons par ordre d'importance : Biskara, El-oued, Tipaza, Chlef, Tlemcen. Cependant qu'Alger occupe la 6 éme rang avec 658 165 qx (MADR, 2016).

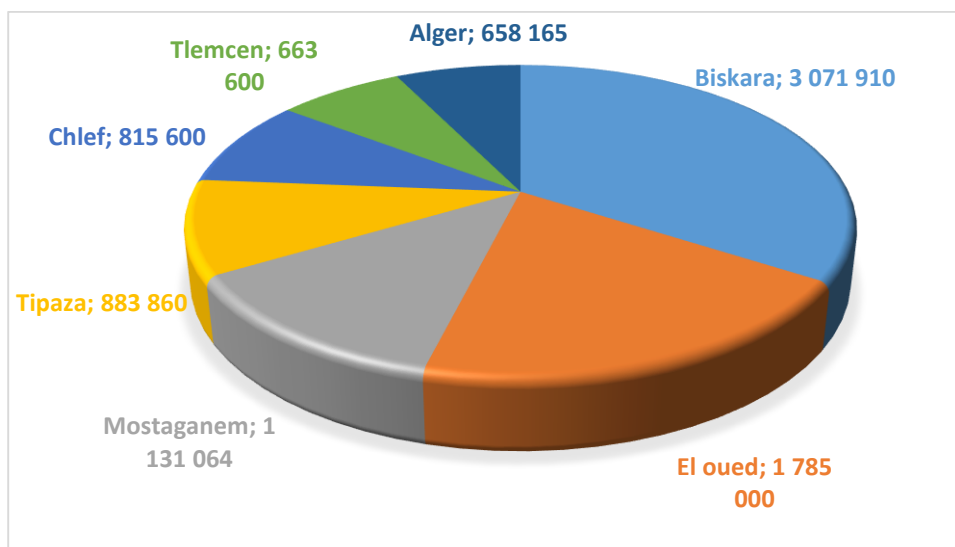


Figure 5: Principales wilayas productrices de la tomate en Algérie en 2016

Selon l'ITCMI (2014), la semence utilisée en Algérie provient totalement de l'étranger et principalement de Hollande, France et d'Amérique.

Les variétés de tomate cultivées sont classées selon leur croissance du type déterminée ou indéterminée.

Les variétés à croissance indéterminée : Marmande Saint pierre Actana, Agora, Bond, Nedjma, Toufan, et Zahra (ITCMI, 2014).

-Les variétés à croissance déterminée : Aicha comme Farouna, Joker, Luxor, Tomaland, Zigana, Zeralda (ITCMI, 2014).

II.2 LA CULTURE DE LA POMME DE TERRE

2.1. Historique et origine de la pomme de terre

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est une plante annuelle d'origine sud-américaine. Elle a été découverte au Pérou pour la première fois en 1533 par l'espagnol Pedro de Cieza. Ainsi depuis les Andes péruviennes où les Incas l'employaient comme aliment, elle fut ramenée en Europe (Espagne) par les navigateurs espagnols en 1534, où elle est cultivée par les moines de Seville en 1573, sous le nom de Papa. Depuis lors, la pomme de terre va conquérir l'Europe, d'abord l'Espagne où elle prendra le nom de patata, puis l'Italie où elle est désignée taratoufli, l'Irlande (potato), l'Allemagne puis la France.

En Afrique, la pomme de terre a été introduite à la fin du 19^{ème} siècle par le colonisateur européen. Aujourd'hui, on la rencontre très fréquemment en zones arides où elle alimente le marché des produits agricoles.

2.2. Description botanique

L'espèce *S. tuberosum* est divisée en deux sous-espèces : *tuberosum* et *andigena*. La sous-espèce *tuberosum* est la pomme de terre cultivée à grande échelle en Amérique du Nord et en Europe. La sous-espèce *andigena* est également cultivée, mais uniquement en Amérique centrale et en Amérique du Sud (Hawkes 1990 ; OECD 1997).

Le génome de la pomme de terre cultivée est tétraploïde et comprend 48 chromosomes ($2n = 4x = 48$).

Cette espèce végétale appartient à sa classification exhaustive est présentée par Hawkes, 1990

Tableau 5 : Classification botanique de la pomme de terre.

Embranchement	<i>Spermatophytes</i>
Sous-embranchement	<i>Angiospermes</i>
Ordre	<i>Polemoniales</i>
Famille	<i>Solanaceae</i>
Genre	<i>Solanum L.</i>
Espèce	<i>Tuberosum</i>

Source : Hawkes, 1990

Cette espèce s'adapte aux différentes zones climatiques des régions tropicales et extra tropicales.

2.3. Description morphologique

Le *Solanum tuberosum* est une plante herbacée de 0,4 à 1,4 m de hauteur dont le port varie de dressé à entièrement prostré (Spooner and Knapp, 2013).

- **Le système aérien**

Le système aérien est annuel.

- Les tiges sont aériennes, au nombre de 2 à 10, parfois plus, et ont un port plus au mois dressé et une section irrégulière ;
- Les feuilles composées qu'elles portent permettent, par leurs différences d'aspect et de coloration, de caractériser les variétés.
- Les fleurs, dont la couleur et le nombre caractérisent les variétés. Sont généralement autogames, mais souvent stériles.
- Les fruits ou baies qu'elles produisent contiennent des graines dont l'intérêt est nul en culture (Soltner, 1979).

- **Le système souterrain**

- Le système souterrain porte des tubercules vivaces.
- Les racines, nombreuses et fines, fasciculées et peuvent pénétrer profondément le sol, s'il est suffisamment meuble.

- Les tiges souterraines ou rhizomes, ou stolons, sont courtes et leurs extrémités se renflent en tubercules.
- Ces tubercules sont les organes de conservation qui permet de classer la pomme de terre parmi les plantes vivaces à multiplication végétative (**Soltner, 1979**).

2.4. Cycle de développement de la pomme de terre

Le cycle de développement de la pomme de terre est annuel et comprend 05 phases :

➤ **Le repos végétatif**

A la récolte, le tubercule de pomme de terre ne peut germer même si les conditions de croissance sont favorables (température de 18 à 25° C) et hygrométrie 90%. Sa durée constitue un caractère variétal mais peut être abrégé ou maintenu par différents constituants physiques ou chimiques..

➤ **La germination**

A la fin du repos végétatif, le germe entre en croissance s'il n'y a pas dormance induite par les conditions du milieu (**Madec, 1966**).

Madec et Perennec (1962) ont dénommé stade d'incubation, le stade de tubérisation des germes, et période (phase) d'incubation, le temps s'écoulant entre le départ de la germination et la formation des nouvelles ébauches du tubercule par les germes.

➤ **La croissance**

A partir des germes produits par le tubercule, se forment des tiges feuillées puis des stolons et des rameaux (**Bissati, 1996**).

➤ **La tubérisation**

Au bout d'un certain temps, variable selon la variété et le milieu, les extrémités des stolons cessent de croître et se renflent pour former, en une ou deux semaines, les ébauches des tubercules : c'est la tubérisation. Elle se prolonge. Jusqu'au fanage de la plante, par la phase de grossissement. Aucun indice ne permet de déceler, sur les organes aériens, le moment de cette ébauche des tubercules (**Soltner, 1979**).

➤ **La maturation des tubercules**

Elle se caractérise par la sénescence de la plante, par la chute des feuilles ainsi que l'affaiblissement du système racinaire et les tubercules atteignent leur maximum de développement (**Perennec et Madec, 1980**).

2.5. Ecologie de la pomme de terre

La plante de pomme de terre a des exigences spécifiques, qui sont :

2.5.1. Exigences climatiques

✚ **La température**

La pomme de terre est caractérisée par un zéro de végétation compris entre 6 et 8°C.

L'optimum de température pour la croissance se situe entre 14 et 17°C et le feuillage est détruit à 3°C et 4°C. Le tubercule gèle entre 1°C et 2.2°C.

✚ La lumière

La pomme de terre est une plante héliophile. Ses besoins en lumière sont importants surtout pendant la phase de croissance. Ce facteur est déterminant pour la photosynthèse et la richesse en fécule des tubercules (**Moule, 1972**).

✚ L'humidité

Dans le cas d'une culture de pomme de terre ; l'humidité est un facteur limitant de la production bien sur taux suffisant pour permettre à la plante de suivre son développement le plus normalement possible, à noter qu'une carence ou un déficit en humidité pourrait avoir des conséquences très graves vis-à-vis des rendements surtout aux stades croissance et tubérisation. (**Abd El Monaim, 1999**).

2.5.2. Exigences édaphiques

✚ Le sol

La pomme de terre est une plante qui s'accommode à toutes les terres, à condition que celles-ci soient suffisamment alimentées en eau. Elle préfère cependant les terres légères, siliceuses ou silico-argileuses, au sous-sol profond (**Abd El Monaim, 1999**).

✚ Le pH

Moule (1972) rapporte que la pomme de terre supporte les pH assez bas de 5.5 à 6.

Néanmoins elle peut s'adapter aux sols faiblement alcalins.

2. 6. Importance économique

2.6.1. Dans le monde

La pomme de terre se classe au quatrième rang mondial des cultures vivrières, derrière le maïs, le riz et le blé (**FAO, 2017**).

Le secteur de la pomme de terre est connu des fluctuations durant les deux dernières décennies (figure6). Ainsi jusqu'au début des années 90, la plupart de la production était cultivée et consommée essentiellement, en Europe, en Amérique du nord et dans les pays de l'union soviétique. Depuis, la production et la demande ont enregistré une forte croissance en Asie, en Afrique et en Amérique Latine, où la production est passée de moins de 30 millions de tonnes au début des années 60, à plus de 376 millions de tonnes en 2016, pour une superficie de 19 246 462 ha (**FASTAT, 2017**).

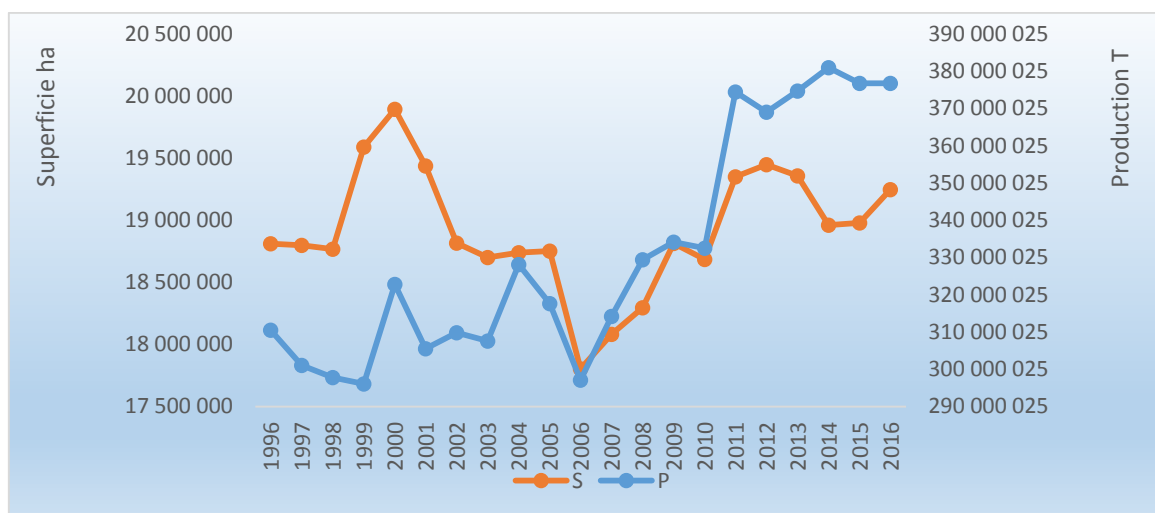


Figure 6: l'évolution de la production et la superficie mondiale de la pomme de terre (1996-2017) (FAOSTAT2017)

Parmi les grands pays producteurs (figure7), nous citons par ordre d'importance : la Chine avec 25% du total mondiale, et l'inde .Les autres principaux producteurs étaient, la Russie, l'Ukraine et les États-Unis. Selon la figure 7 l'Algérie occupé le 14 éme rang mondial avec 4 782 690 tonne (FAOSTAT, 2017).

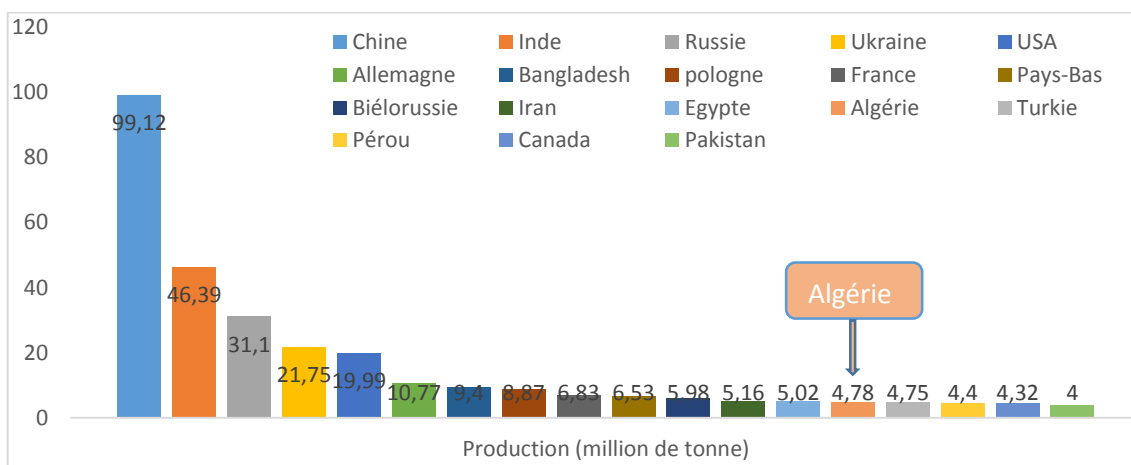


Figure 7: La production mondiale de la pomme de terre en 2016 (FAO STAT)

2.6.2.En Algérie

Après que la pomme de terre fut introduite en Algérie au milieu du XIXe siècle, l'essentiel de la production était expédié en France. En 1962, le pays produisait 250 000 tonnes par an et en exportait environ le tiers.

Depuis, la pomme de terre est devenue l'une des principales cultures destinées à la consommation domestique et en 2016 la production a atteint le chiffre record de 47,826 millions

de qx. La superficie cultivée est de 156 196 ha, et la pomme de terre peut être plantée et récoltée dans n'importe quelle région, à pratiquement n'importe quel mois de l'année.

La consommation annuelle, qui était de 28 kg/par habitant en 1990, est passée à 56 kg en 2005 à 102 kg en 2012 (FAO STAT, 2012).

La culture de la pomme de terre en Algérie a connu un développement spectaculaire. Cet accroissement des superficies cultivées en pomme de terre était accompagné d'une importante augmentation de rendement. Les données des graphiques suivant montrent bien ces augmentations.

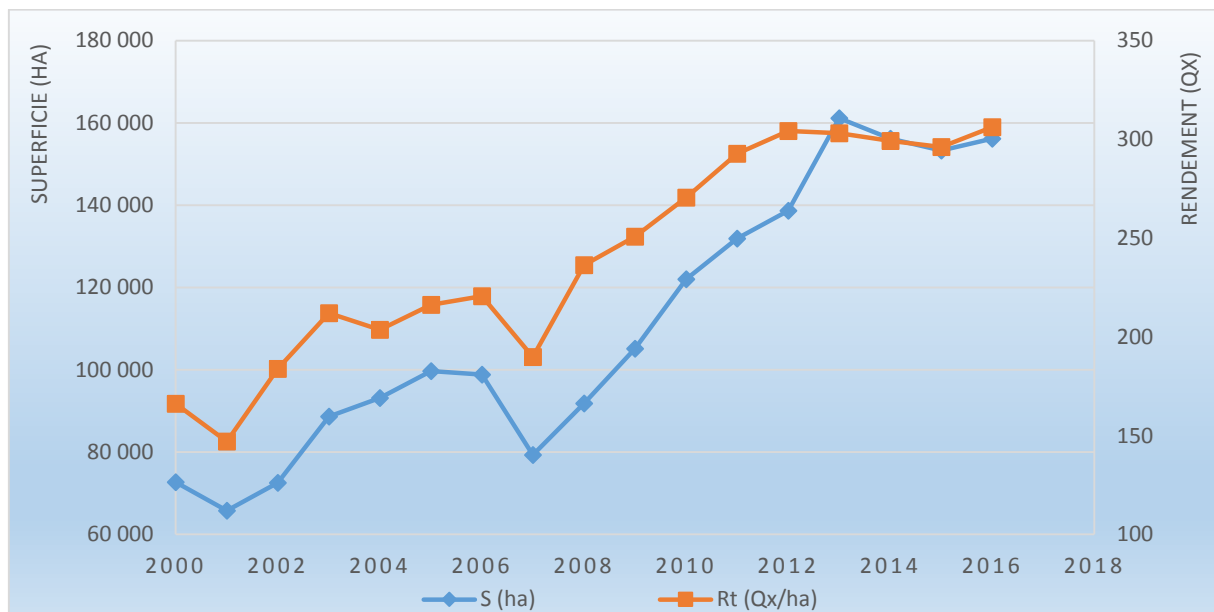


Figure 8: Evolution la superficie et le rendement de la pomme de terre en Algérie (2000-2016)

➤ Principales wilayas productrices de la pomme de terre en Algérie

La superficie occupée par les cultures maraîchères 510 919ha en 2016, dont 156 196 ha emblavés en pommes de terre, soit 30.5% de la superficie maraîchère totale.

Parmi les grandes wilayas productrices (figure 9), nous citons par ordre d'importance : El-oued, Aïn-Defla, Maskara, Mostaganem, Bouira, Tlemcen, Skikda. Cependant qu'Alger occupe la 20ème rang avec 591 620 qx (MADR, 2016).

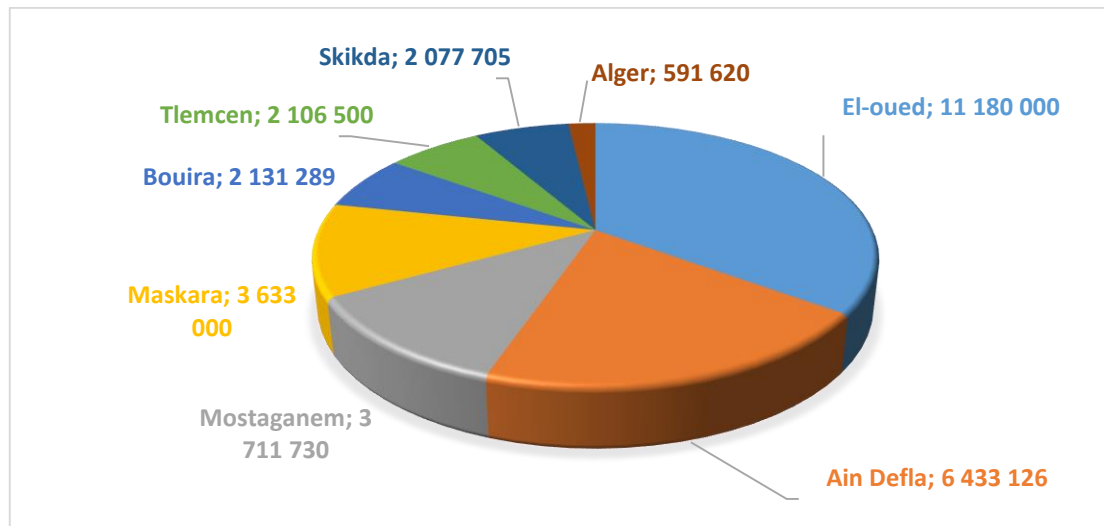


Figure 9 : Les principales wilayas productrices de pomme de terre pour l'année 2016
(MADR, 2016)

Il est à relever aussi que l'on assiste, depuis quelques années, à l'augmentation de cette culture par l'occupation de nouvelles zones où elle était pratiquement inconnue : cas de Sedrata, de Djelfa, du Sud et d'Ain-Defla. Donc, les zones de production sont réparties selon quatre zones géographiques : Littoral, sublittoral, atlas tellien et hautes plaines.

- ✚ **Primeur** : Boumerdes, Tipaza, Skikda, Alger, Mostaganem, Tlemcen
- ✚ **Saison** : Ain-defla, Mascara, Mila, Souk ahras, Boumerdes, Mostaganem, Sétif, Tizi ouzou, Tiaret, M'sila, Tlemcen, Batna, Chlef, Bouira, El-oued.
- ✚ **Arrière-saison** : Ain-defla, Mascara, Guelma, Chlef, El oued, Tlemcen, Mostaganem, Djelfa

Les variétés de pomme de terre destinées à la production et à la commercialisation en Algérie sont : Spunta(B), Fabula (B), Nicola (B), Diamant (B), Timate (B), Atlas (B), Bartina, Désirée, Kondor B = blanche, R= rouge 2

III. Présentation de l'outil de simulation

La modélisation peut être définie comme un moyen de formalisation conceptuelle d'un système, exprimée sous forme d'une ou de plusieurs hypothèses (**Van Ittersum et Donatelli, 2003**). Elle est un outil de recherche selon **Daalen et Shugart (1989)**, qui permet de synthétiser l'information connue et d'en identifier les manques.

Le modèle peut donc être considéré comme une représentation simplifiée d'un système réel. Il sont utilisés dans la recherche fondamentale pour mieux comprendre les relations entre les plantes, le sol et l'environnement, afin de faire des prévisions de rendements, des analyses de risques (par exemple effets des dates de semis), à mettre au point des priorités pour la recherche afin de réduire les coûts liés à l'expérimentation.

Ils peuvent permettre ainsi la simulation de l'impact de futurs scénarios de gestion avant leur mise en application, fournissant aussi des tendances pour des discussions entre utilisateurs et exploitants agricoles.

On peut distinguer trois grandes catégories de modèles de fonctionnement de par leur niveau de complexité et leur aptitude à être spatialisés, c.à.d. utilisés sur de grandes surfaces.

Tableau 6: les principales grandes catégories de modèles de culture.

Catégorie de modèle	Fonctionnement de modèle	Exemple
Les modèles écophysiologicals	simulent de façon mécaniste les principaux processus clés du fonctionnement des plantes (photosynthèse, respiration, bilan hydrique etc.). Les processus impliqués sont simulés par des relations qui peuvent être biophysiques ou empiriques.	-STICS (Brisson et al., 2003). -SUNFLO (Casadebaig et al., 2011). -SWHEAT (Van Keulen and Seligman, 1987). -Sirius (Jamieson et al., 1998). - AFRCWHEAT2 (Porter, 1993). - CERES-Maize (Dyke et al., 1986). - SUCROS2 (van Laar et al., 1992).
Les modèles empiriques	calculent la production de biomasse à partir de l'équation de Monteith et d'une somme d'indices de végétation.	NDVI (Tucker and Sellers, 1986 ; Dong et al., 2003 ; Wessels et al., 2006).
Les modèles agro-météorologiques semi-empiriques	Ces modèles combinent l'équation de Monteith avec quelques processus majeurs permettant de prendre en compte les principales phases du cycle de développement des plantes (levée, croissance et sénescence). Ils ont un nombre de formalismes et de paramètres restreints et, à l'instar des modèles « simples », ils sont adaptés à l'étude de grandes surfaces et spécifiquement conçus pour les cas où les données d'entrée sont limitées (Maas, 1993 ; Liu et al., 2010).	-SAFY (Duchemin et al., 2008, 2015), -AqYield (Constantin et al., 2015). -PolyCrop (Nana et al., 2014). -AquaCrop (Steduto et al., 2009). -Pilote (Mailhol et al., 1997). -GRAMI (Maas, 1992).

Dans notre étude, nous essayons de tester un modèle informatique « **Acquacrop** ».

1. Description du modèle

AquaCrop est un modèle qui simule la productivité des cultures. Il a été développé par “Land and Water Division of FAO”. Cette dernière a élaboré AquaCrop dans un effort pour augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau dans la production alimentaire (**Araya et al. 2010**).

Ce modèle a été choisi, car il combine les avantages d'être simple à manier et d'afficher des résultats complets. Il requiert peu de données d'entrée et fournit une large série de résultats.

De plus, ce modèle a été paramétré et testé pour de nombreuses cultures telles : les céréales comme l'orge (**Alemie et Kebede, 2010**), le blé dur (**Benabdelouahab, 2015**), le maïs (**Oiganji, 2016**) ou du maraîchage comme le chou (**Wellens et al, 2014**) et ce, pour une large gamme de conditions climatiques. Ces études révèlent que le modèle simule de façon assez précise l'évolution de la biomasse aérienne, le rendement en grain, les mouvements et le bilan de l'eau dans le sol (**Toumia et al, 2015**).

2- Les caractéristiques du modèle

Les caractéristiques qui différencient AquaCrop d'autres modèles de cultures sont :

- son focus sur l'eau ;
- l'utilisation de la couverture par la canopée au lieu de l'indice foliaire ;
- l'utilisation de valeurs normalisées de productivité de l'eau (WP) pour des demandes évaporatoires et des concentrations de CO₂, qui confèrent au modèle une grande capacité d'extrapolation pour divers emplacements, saisons et climats, y inclus des scénarii de climats futurs ;
- le relativement petit nombre de paramètres ;
- des données d'entrée qui nécessitent le plus souvent des paramètres et variables explicites et souvent intuitifs ;
- une interface utilisateur facile à l'emploi et intuitive ;
- son équilibre considérable entre la précision, la simplicité et la robustesse ;
- la possibilité de l'appliquer dans des divers systèmes agricoles existants à travers le monde.

3. Applications

L'AquaCrop est principalement destiné aux praticiens comme les agents de vulgarisation et d'encadrement, les associations des usagers de l'eau, les ingénieurs et consultants, les gestionnaires des périmètres irrigués et des exploitations, les décideurs et les économistes.

Le modèle a été conçu pour un large éventail d'applications. Il est particulièrement utile :

- pour développer des stratégies d'irrigation dans des conditions de déficit en eau ;

- pour étudier l'effet sur le rendement de l'emplacement, du type de sol, de la date de semis ;
- pour étudier l'effet de différentes techniques de gestion des terres sur le rendement ;
- pour comparer le rendement réel et optimal sur une parcelle, un périmètre ou une région afin d'identifier les contraintes limitant la production de la culture et la productivité de l'eau ;
- pour prédire les impacts du changement climatique sur la production agricole ;
- pour des simulations de scénarii et pour la planification par des économistes.

AquaCrop comprend trois grands modules (Figure 10): environnement, simulation et project.

a. L'environnement AquaCrop comprend quatre parties :

- Une partie climat pour la saisie des données météo (Tmax, Tmin, pluies, ...);
- Une partie culture pour la saisie des données agronomiques de la plante;
- Une partie sol pour la saisie des données pédologiques.
- Une partie management (techniques agricoles) pour la saisie des techniques agricoles pratiquée;

b. La simulation AquaCrop comprend deux parties:

La période de simulation ;

Les conditions initiales.

c. La partie project AquaCrop :

Cette partie sert à faire des projets de simulation unique ou multiples (successives).

4. Architecture du modèle

La réponse du rendement à l'eau décrit la relation entre le rendement de la culture et le stress hydrique, en raison de l'insuffisance à fournir de l'eau par les précipitations ou l'irrigation durant la période de croissance (**Doorenbos et Kassam. 1979**)

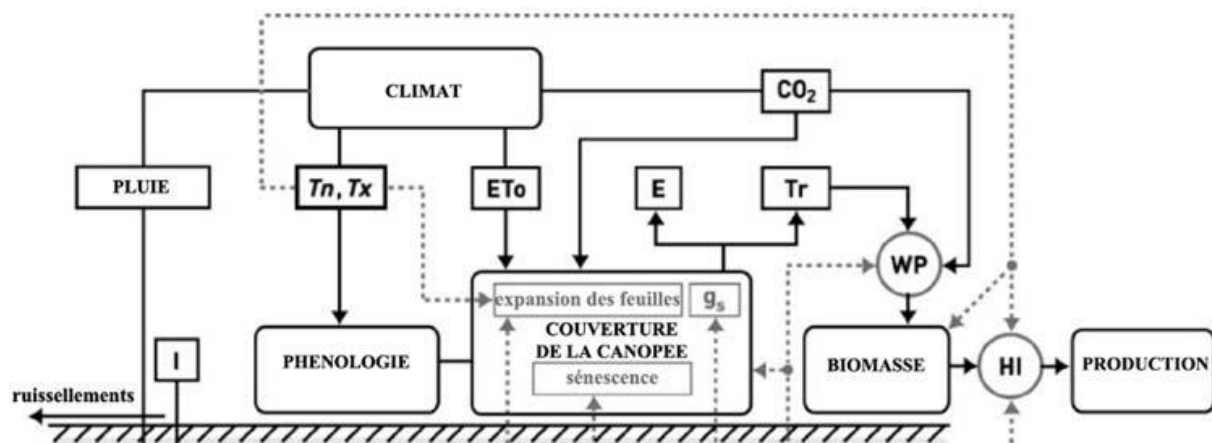


Figure 10: Organigramme d'AquaCrop indiquant les principales composantes de la relation sol-eau-plante

AquaCrop a évolué en:

- i) séparation l' ET en transpiration des cultures (Tr) et évaporation des sols (E);
- ii) considérant le rendement final Y en fonction de la biomasse B et indice de récolte HI et considérant et séparant les effets du stress hydrique sur B et sur HI

L'équation centrale de la nouvelle AquaCrop est donc:

$$B = wp \cdot \sum Tr$$

Où Tr est la transpiration de la culture (en mm) et WP est le paramètre de productivité de l'eau (Kg de biomasse par m^2 et par mm d'eau de transpiration cumulée durant la période de production de biomasse).

1. Choix de la région d'étude

Les simulations des besoins en eau des cultures ont été effectuées dans la région d'Alger.

Le choix d'Alger est repose sur :

- Son importance en matière d'alimentation en eau, Elle occupe, aujourd'hui, une place importante dans la stratégie de mobilisation des ressources en eau.
- La disponibilité des données météorologiques pour cette région.
- Son importance dans le domaine agricole qu'il mensonges dans l'occupation des premiers rangs dans la production des maraichages.

2. Situation géographique

Alger est une subdivision administrative algérienne située au nord –centre du pays et occupe une position géostratégique intéressante, aussi bien, du point de vue des flux et échanges économiques avec le reste du monde, que du point de vue géopolitique. Elle est située à une altitude de 25m et en 36°45' de latitude nord et 3°02' de longitude ouest. Elle a une superficie de 809 km² et une population est de 2 988 145 habitants (ONS 2014).

Elle est limitée, au Nord par la mer méditerranée, à l'est par la wilaya de Boumerdes à l'ouest par la wilaya de Tipaza, et au sud par la wilaya de Blida (Figure9).



Figure 9: carte géographique de la wilaya d'Alger

3. Relief

Le relief de la wilaya d'Alger se caractérise par trois zones longitudinales (ANDI, 2013) :

- Le sahel à l'ouest de la baie d'Alger.
- Le littoral, dominé par le Sahel, est constitué par une ancienne terrasse étroite faible.
- La Mitidja formant de sols de bonne fertilité favorisant le développement de cultures maraichères.

4. Le sol

D'après **ANRH, 2014** l'analyse granulométrique a été réalisée dans les laboratoires de l'agence nationale des ressources hydrauliques. Les sols de la wilaya est de texture argilo-limoneuse.

5. Le climat

Pour caractériser le climat de notre zone d'étude, nous sommes basés sur les données météorologiques de la station Dar-El-Beida qu'il situe à 25 m de l'altitude.

Alger se caractérise par un climat méditerranéen tempéré. Elle est connue par ses longs étés chauds et secs. Les hivers sont doux et humides, la neige est rare mais pas impossible. Les pluies sont abondantes et peuvent être diluviennes. Il fait généralement chaud surtout de la mi-juillet à la mi-août.

La wilaya d'Alger reçoit des quantités annuelles de précipitations variant en moyenne entre 400 mm et 1 200 mm. Elle est de ce fait plus arrosée que le reste du pays. Les températures hivernales varient entre 8 °C et 15 °C. Elles grimpent à 25 °C au mois de mai pour atteindre une moyenne de 28 °C à 30 °C en juillet et août. Lors des précipitations de neige, la température peut descendre à moins de 6 °C (**ANDI, 2013**).

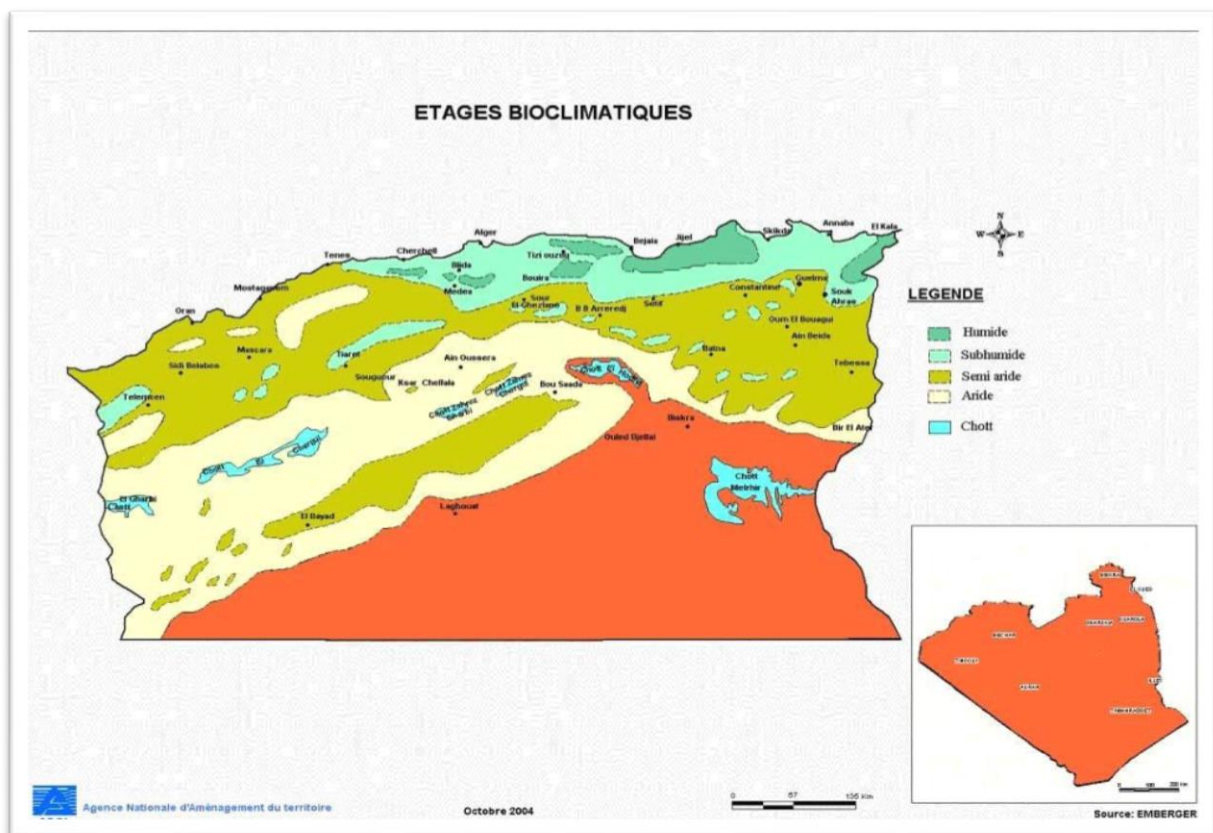


Figure 10 : Etages bioclimatiques de la zone d'étude (Nedjraoui et Bedrani, 2008)

6. Ressources hydriques

En Algérie, les ressources en eau sont limitées, vulnérables et inégalement réparties dans l'espace et dans le temps. Par ailleurs, elles ont subi durant les deux dernières décennies les effets négatifs de la sécheresse, de la pollution et d'une mauvaise gestion (Hadibi et al., 2008). D'après (ANRH) Alger est alimentée à 56 % par des eaux superficielles, à 21 % par des eaux souterraines (figure 11) et à 23 % par des eaux non conventionnelles (dessalement d'eau de mer).

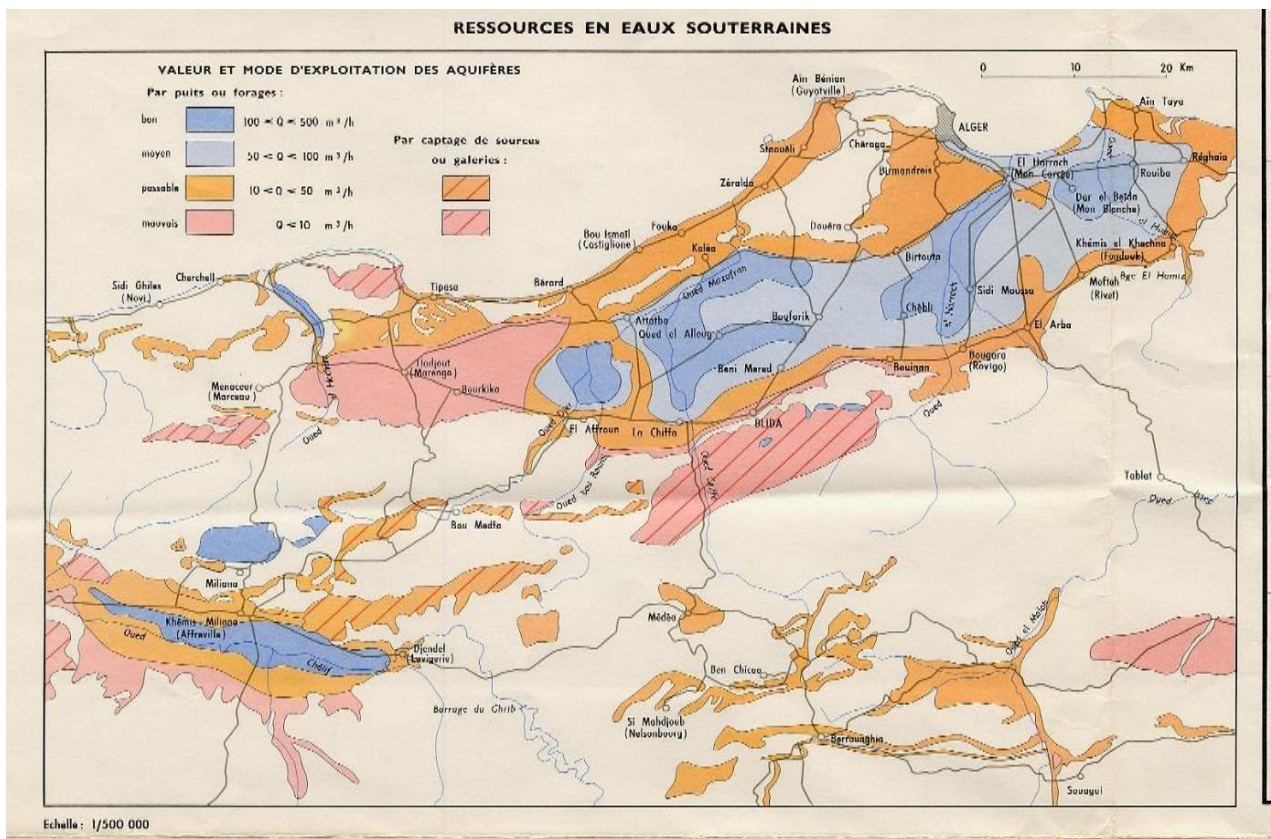


Figure11: carte géographique des ressources en eaux souterraines de la région d’Alger (ANRH, 2018)

6.1. Les oueds

La région est traversée par plusieurs fleuves et plusieurs cours d'eau qu'on nomme indifféremment Oued. Tous les fleuves qui la traversent se jettent dans la méditerranée qui borde toute la côte algéroise. Son système hydrographique est propre au milieu méditerranéen : Le massif de Bouzaréah, connu par ses reliefs accidentés, possède un réseau hydrographique très dense, drainé par huit principaux cours d'eau (Baranès, Sidi Medjber, Frais vallon, Jaubert, Scotto Nadal, Chemin du Fort, Birtraria et Oued Koriche ou Oued Atoun (Ex. Oued Mkacel).

À l'ouest l'oued Mazafran constitue la frontière entre les wilayas d'Alger et de Tipaza, plus à l'est, entre Chéraga et Aïn Benian, l'embouchure de l'oued Beni messous. À l'est, les oueds El Harrach, El Hamiz et Réghaïa ainsi la zone dite «le lac de Réghaïa ».

6-2-Les barrages

Alger est alimentée en eau potable par du barrage de Douéra (87 000 000 m³), ainsi que de l'eau des barrages des wilayas limitrophes qui est présenté dans la figure suivante:

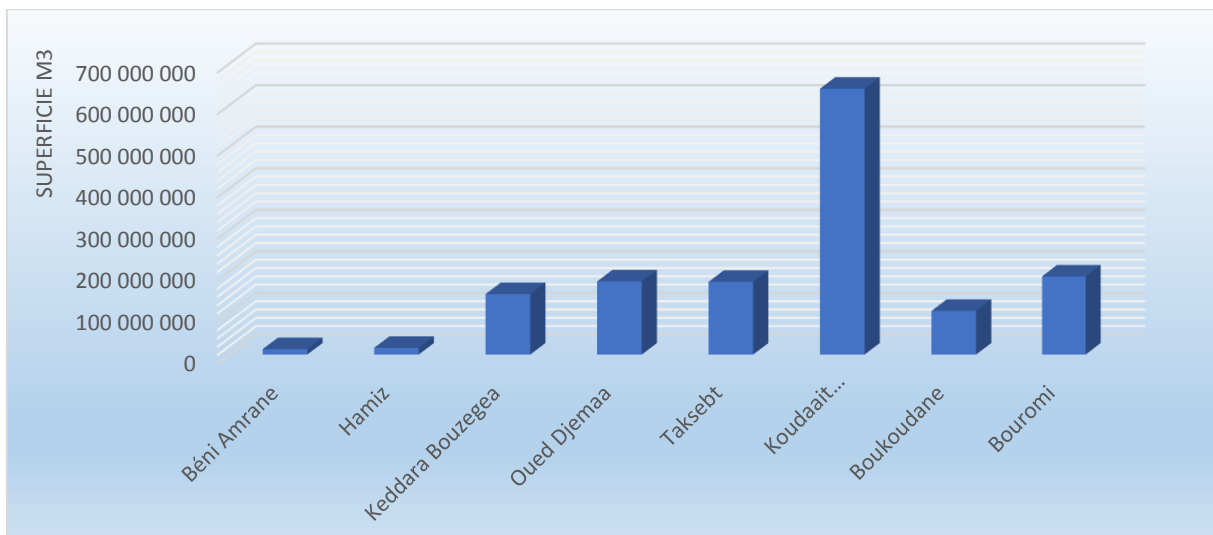


Figure 11: les barrages alimentés la wilaya d'Alger (ANRH).

6.3. Stations de dessalement d'eau de mer

Cette wilaya comprend la station de dessalement d'eau de mer d'El Hamma (200 000 m³/jour) .cette station est destinée à fournir de l'eau potable aux habitants de la ville d'Alger et de sa région.

7. Evolution des productions agricoles

Le total des terres agricoles utilisées dans la wilaya d'Alger est de 33 581 ha soit 87.3% pour une superficie totale de la wilaya en 2010 et de 29 465 hectares soit 87.7% en 2016, (**MADR 2016**). Les principales productions végétales selon (**MADR 2016**) sont présentées dans la figure

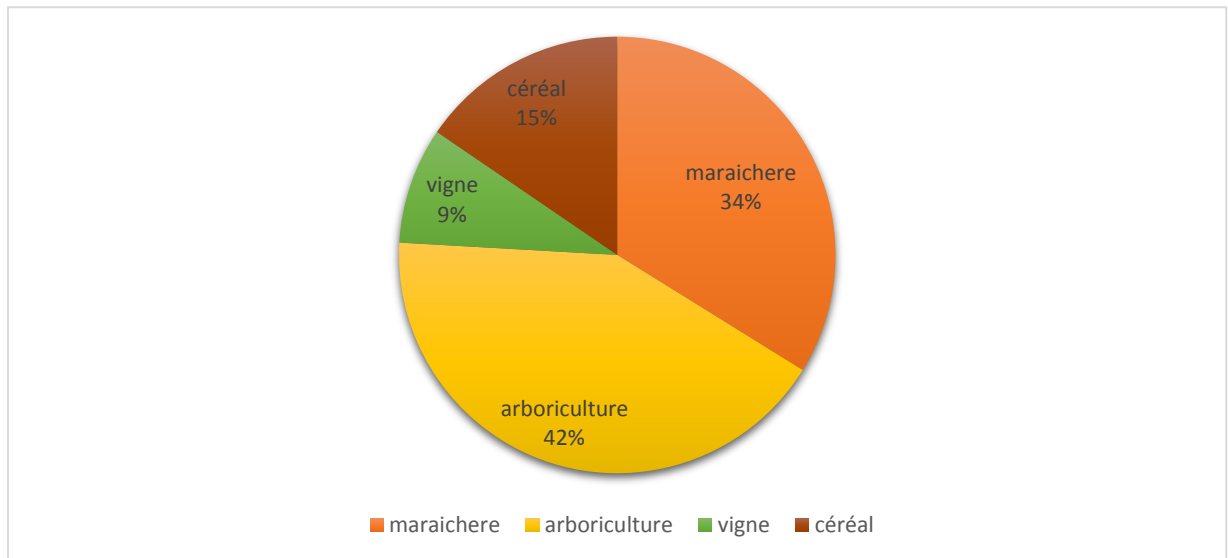


Figure 12: répartition des principaux produits végétaux dans la wilaya d'Alger

Les terres agricoles dans la wilaya d'Alger sont classées dans la zone « Une ».

Cette zone « Une » est caractérisée par une très bonne qualité des terres agricoles et sa richesse en produits favorisant les activités agricoles, ainsi que par un climat favorable, notamment une pluviosité assez importante, des reliefs facilitant le travail de la terre et un accès facile des moyens mécaniques aux exploitations agricoles (plaines) en plus de l'abondance de l'eau (ANDI, 2013).

8. La filière des maraichères en Alger

Le choix des cultures a été fait car la tomate et la pomme de terre, en Algérie, fait partie des produits de consommation de base, elles revêtent un caractère stratégique de par leur place dans notre alimentation, les surfaces qu'elles occupent, les emplois qu'elles procurent et les volumes de production qu'elles génèrent.

En Alger, les cultures maraichères occupent une superficie très importante, estimée à 8 833 ha en 2016 avec un rendement de 250.9 qt/ha. La tomate et la pomme de terre représentent respectivement 19.4% et 17% de la production maraichère régionale. Avec une superficie de 1 168 ha pour la tomate et 1 516 pour la pomme de terre selon les statistiques de **MADR 2016**, ce c'est ce qui lui permet d'occuper le 6^{ème} rang au niveau national et la 19^{ème} pour la pomme de terre.

9. L'évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence est un facteur clé dans la détermination des besoins de la plante. La formule FAO Penman-Monteith est retenue comme standard par la FAO depuis 1998 pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence (Allen et al, 1998), elle est utilisée par le logiciel Aquacrop pour calculer les besoins en eau de tomate et pomme de terre à partir des données climatique préparées auparavant.

Avant de calculer ET de la tomate et la pomme de terre, il convient d'étudier les facteurs climatiques dans le sone en considération.

10. Inventaire des données

Les données météorologiques sont à pas de temps mensuels pour une période allant de 1970 à 2017. Les données se compose de : données climatiques : pluviométrie, températures, humidités, durée d'insolation, vitesse du vent.

Ces données sont collectées auprès de l'organisation National de la Météorologie (O.N.M), et à partir du Bulletin Décadaire Agrométéorologique, À partir de ces sources, nous avons essayé de constituer une base de données qui permet de calculer l'ETP sur la période d'observation de 47 années agricoles débutant au 1er septembre 1970 et se terminant le 31 août 2017. D'un autre côté, on a eu recours pour combler les observations manquantes aux sites :

- <http://www.ogimet.com>, (données journalières et mensuels),

- <http://www.climexpknmi.nl> (données journalières),

-<http://www.wunderground.com> (données journalières et mensuels).

L'étude de ces facteurs climatiques porte sur l'analyse statistique (moyenne, écart-type, covariance) de la répartition et de la distribution temporelle de variabilité de ces paramètres.

La moyenne est le paramètre climatologique le plus employé, on l'obtient en faisant la somme de des termes annuels de la série et en divisant par le nombre d'années correspondant.

L'écart type de la distribution de la série, représente l'erreur type de la moyenne.

C'est la racine carrée de la variance. Il est l'indicateur de la variabilité, et de ce fait, détermine la dispersion des différentes valeurs autour de la moyenne

Le covariance ou écart type relatif a aussi été utilisé en climatologie. C'est le rapport de l'écart type à la moyenne.

Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Ce diagramme permet de situer d'une façon générale la période sèche au cours du cycle agricole (septembre- aout) durant la période (1970-2017) en considérant les précipitations et les températures moyennes enregistrées dans la zone.

11. Besoins en eau

Pour déterminer les besoins en eau de la tomate et la pomme de terre nous avons utilisé le logiciel aquacrop

Paramètres et variables nécessaires à la simulation par Aquacrop

1) Les données liées au climat

La série climatique préparée auparavant est introduite dans le logiciel pour calculer les valeurs de l'ETP à partir de l'équation de Penman-Montith.

2) Les données liées à la culture

Le logiciel exige de faire entrer les caractéristiques de la culture de tomate et la pomme de terre qui sont notamment pour chaque parcelle: la date de semis, la densité de semis à l'émergence, le nom de l'espèce, les phases végétatives et leurs durées ainsi que la date de récolte, les données qui nous avons introduites est d'après les brochures de l'ITCMI, FAO 1978a et FAO 1980c. Ces paramètres sont récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau 5: paramètres culturale introduites dans le logiciel Aquacrop.

Description	Tomate	Pomme de terre
1-Type de culture	Fruit	Tubercule
2-Méthode de plantation	Transplantation	Transplantation
3-date de plantation	Mai	février
4-la longueur de Cycle de développement	140 Jrs	110 Jrs
5-La taille de la canopé	15à20 cm	20
6-Densité de plantation	27 700 plantes/ha	45 000 plantes/ ha
7-Cycle de développement		
Emergence	4 Jrs	12 Jrs
Max de canopé	85	82
Senescence	95	90
Maturité	110	71
Début de floraison	51	51
Duré de floraison	34	10
8-prorondeur max d'enracinement	1.2 m	80 cm
9-profondeur min d'enracinement	0.3 m	0.3 cm
9- Kc	1	1.05
Type de fixation de CO2	C3	C3
10- T° base	11 C°	6 C°
11- T° max	34 C°	35 °

3) Les données liées au sol

Les propriétés hydrauliques de chaque couche de sol sont indispensables à la simulation avec AquaCrop. Ces paramètres suivants sont tirés de la manuelle du modèle AquaCrop :

La saturation, la capacité au champ, le point de flétrissement et la conductivité hydraulique à saturation.

Caractéristique du sol argileux-limoneux	Point de flétrissement (Pwp)	Capacité au champ (FC)	Humidité à la saturation (SAT)	Conductivité hydraulique à saturation
	23%	44%	52%	12 mm/j

En plus de ces données les valeurs de CO₂ atmosphériques sont idem tirées du logiciel Aquacrop qu'ils sont mesurés à l'Observatoire de Mauna Loa à Hawaii, avec un niveau de référence de 369,41 ppm en 2000.

I. Résultats des traitements statistiques des séries de données

Des calculs de base ont été effectués sur les séries brutes de façon à qualifier et quantifier les variations des paramètres climatiques au cours du temps. Les résultats de ces calculs sont présentés dans cette partie.

1. Variations des pluviométriques

➤ Variabilité interannuelle

L'analyse de la variabilité interannuelle des pluviométries au cours des différentes décennies, de 1970 à 2017, a permis de tracer le graphe suivant :

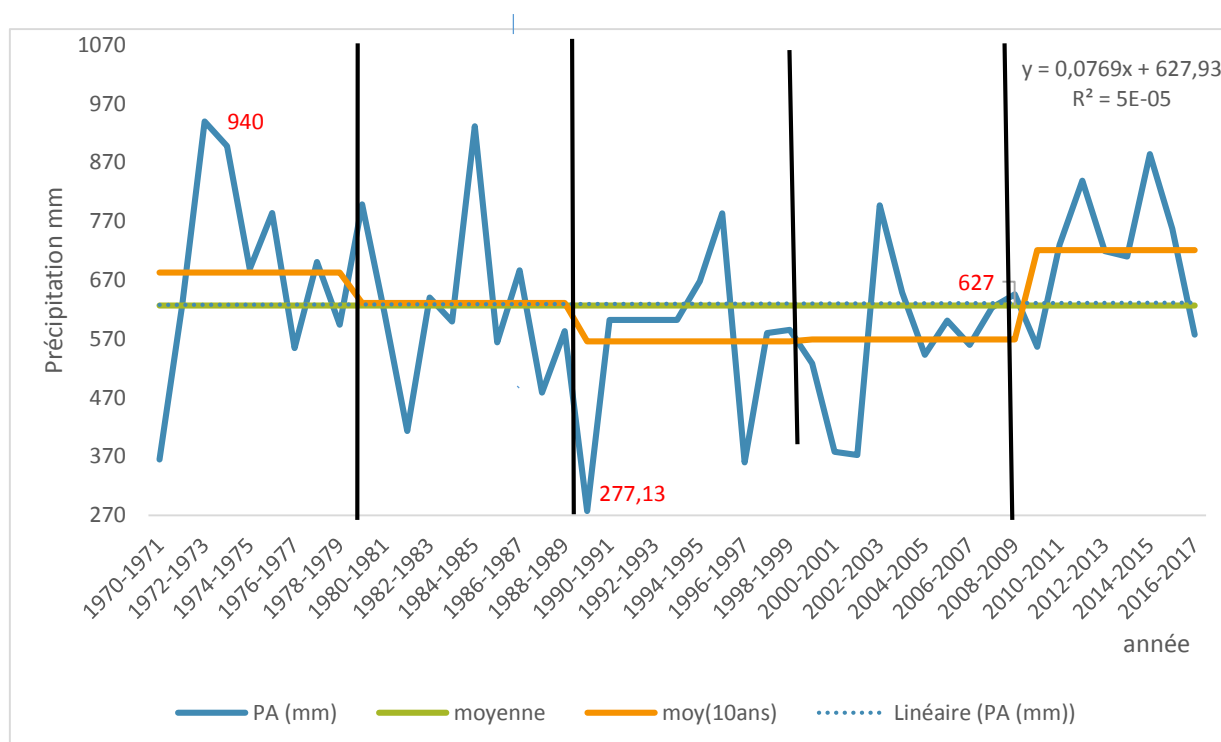


Figure 16 : Variation interannuelle des précipitations (1970-2017)

Les résultats obtenus montrent une répartition hétérogène des intensités pluviométriques sur la région. La valeur moyenne estimée à 627 mm, fluctue entre 277 mm et 940 mm. La variance de la série des moyennes annuelles est égale à 90,8 mm ce qui signifie que la variabilité interannuelle est importante.

La période 1970-2017 commence par une décennie (1970/1971-1980/1981) bien arrosée en général, suivie d'une décennie normale (1980/1981-1990/1991), suivie de deux décennies sèches (1990/1991-2010/2011) et se termine par une décennie arrosée (2010/2011-2016/2017). Les années 1972/1973, 1984/1985 et 2014/2015 sont les années les plus pluvieuses, sur toute la période avec des valeurs 940mm, 898,1mm et 884,3 mm. Alors que 1989/1990 et 1996/1997 sont les années les plus sèches avec 277,13mm et 359,97 mm.

➤ **Variabilité mensuelle**

L'étude de l'évolution des moyennes des précipitations mensuelles dans le temps (figure 17) montre que ces dernières, sont très irrégulièrement échelonnées sur la période (1970-2017). La moyenne des précipitations mensuelles, augmente progressivement de septembre pour atteindre leur maximum en Novembre avec 97,6 mm. Ensuite la chute est progressive de ces précipitations pour atteindre le minimum en Juillet avec 3,1 mm. Donc l'étude de la figure montre que la majorité des précipitations est concentré entre octobre et avril.

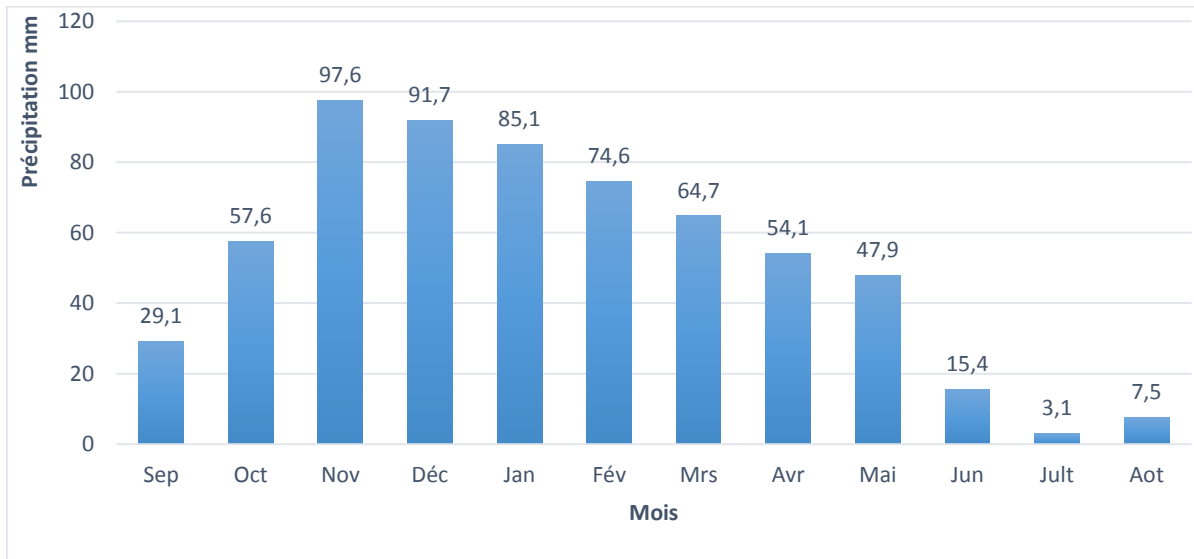


Figure 17 : variation mensuelle des précipitations

➤ **Variabilité saisonnière**

L'étude de l'évolution des moyennes des précipitations saisonnière (figure 18) montre que, Bien que novembre soit le mois le plus pluvieux, on constate que l'hiver est la saison la plus arrosée avec 81,05 mm. Suivie automne avec 61,82 mm suivie le printemps avec 60,68 mm. Cependant l'été est la plus sèche avec 19,16 mm.

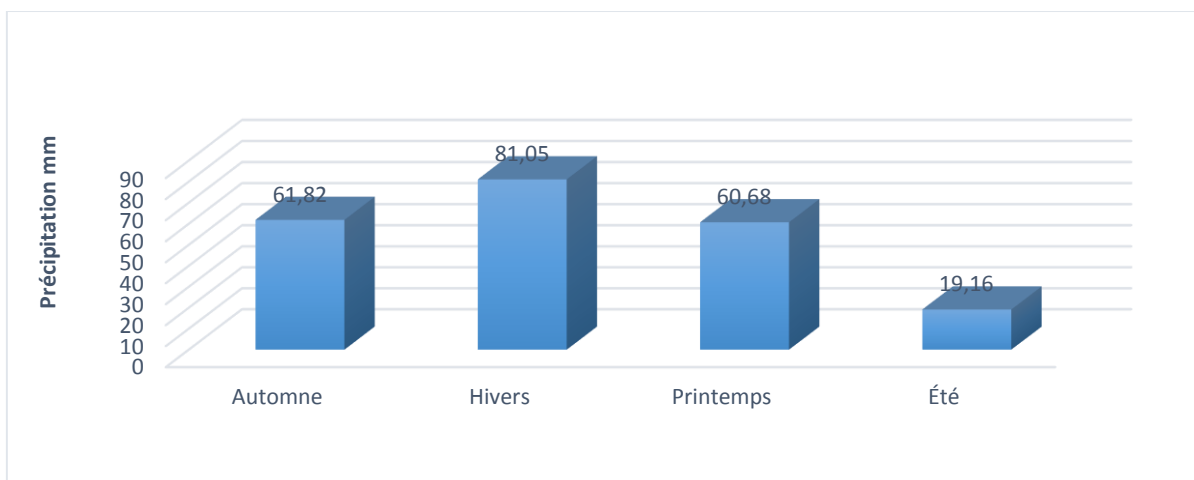


Figure 18 : variation saisonnière des précipitations (1970-2017)

2. Variations de la température de l'air

➤ **Variation annuelle**

Les moyennes annuelles de températures de l'air de la période (1970-2017), ont été calculées pour les deux variables étudiées, les températures minimales (Tn) et maximales (Tx).

Elles sont représentées dans les figures 19 et 20. Ces valeurs permettent de suivre l'évolution moyenne du régime thermique au niveau d'Alger.

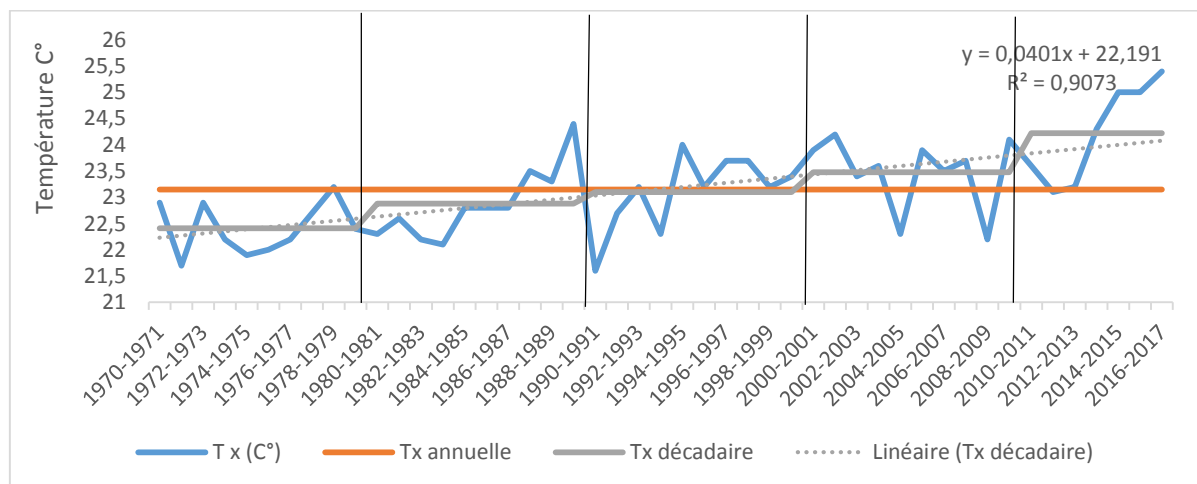


Figure 19: Variations interannuelles de la température maximale de l'air (1970-2017)

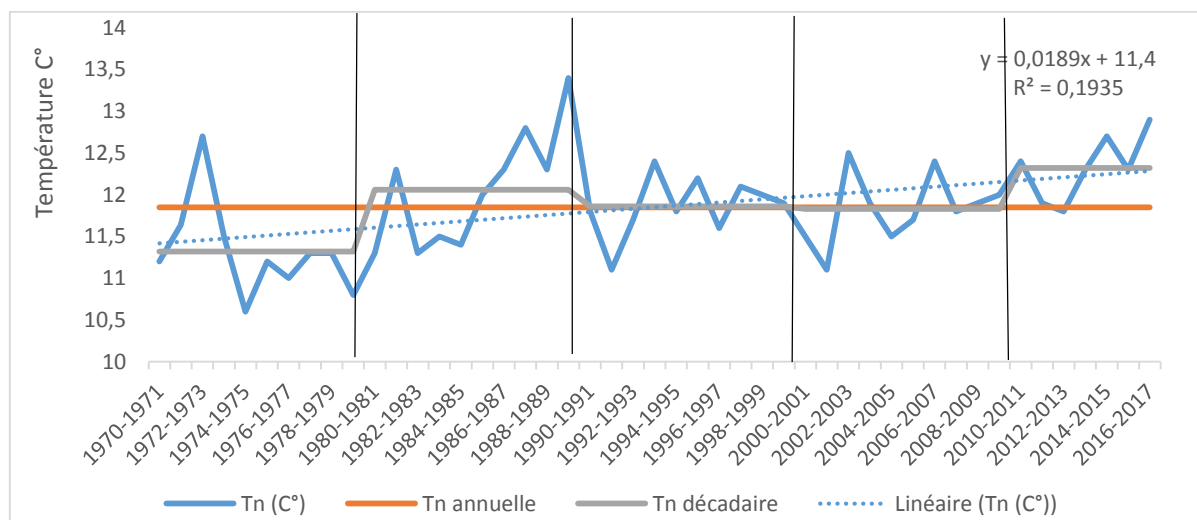


Figure 20: Variations interannuelles de la température minimale de l'air (1970-2017)

Les variations interannuelles de la température de l'air montrent que la température de l'air connaît une hausse régulière sur toute la période.

Les températures max augmentent progressivement, La valeur moyenne estimée 23,15 °C, elle situe entre 21,7°C et 25,4°C On constate donc qu'il fait de plus en plus chaud. Des valeurs supérieures à la moyenne ont été enregistrées à partir de (2000-2001).

Tandis que les températures min connu des fluctuations durant toute la période, La valeur moyenne estimée 11,85 situe entre 10,6 °C et 13,4 °C. La première décennie elle est froide par rapport les autres car la moyenne de cette décade 11,86°C situe au-dessous de la moyenne. Les valeurs de deux décades (1990/1991-2010/2011) sont moyennes, alors que les valeurs des décades (1980/1981-1990/1991) et (2010/2011-2016/2017) ont connues une augmentation.

➤ Variation mensuelle

L'analyse mensuelle montre que la température maximale a augmenté le plus au mois de Juillet (29.7°C). C'est aussi le mois avec la plus forte variation de température minimale (19.8°C).

Tandis que décembre est le mois le plus froid avec 16.8°C de Tx et 5.5°C de Tn.

Les écarts types entre les moyens mensuels sont faibles, ce qui traduit un régime thermique plus ou moins régulier pour tous les mois de l'année, excepté les mois juillet et aout ou les écarts sont supérieur à 2.

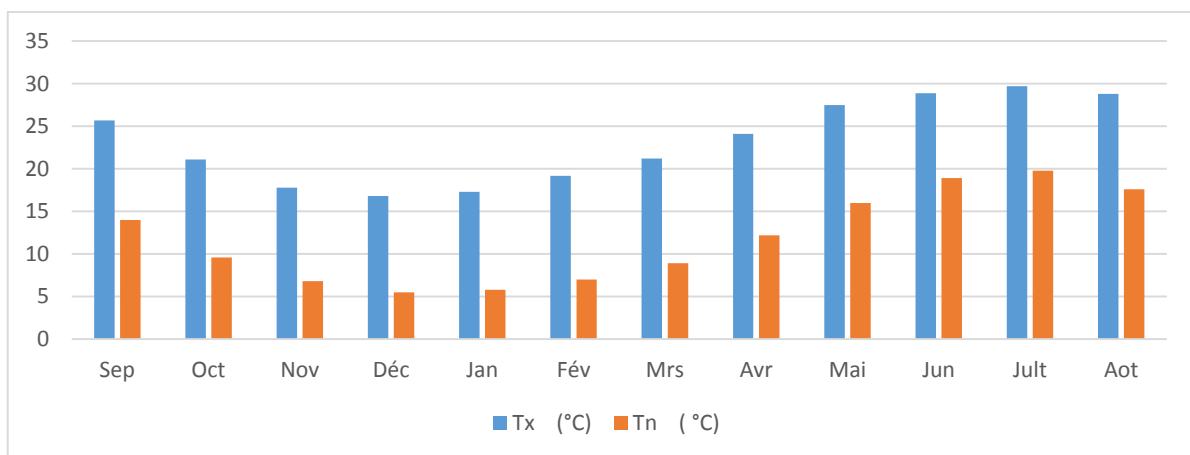


Figure 21 : variation mensuelle des températures max et min de l'air

➤ Variation saisonnière

L'étude de l'évolution des moyennes des températures saisonnière (figure 22) montre que l'été est la saison la plus chaude avec 27.4°C, suivie l'automne avec 25.3°C, suivie le printemps avec 21,5 mm. Alors que l'hiver est la saison la plus froide avec 18.1°C.

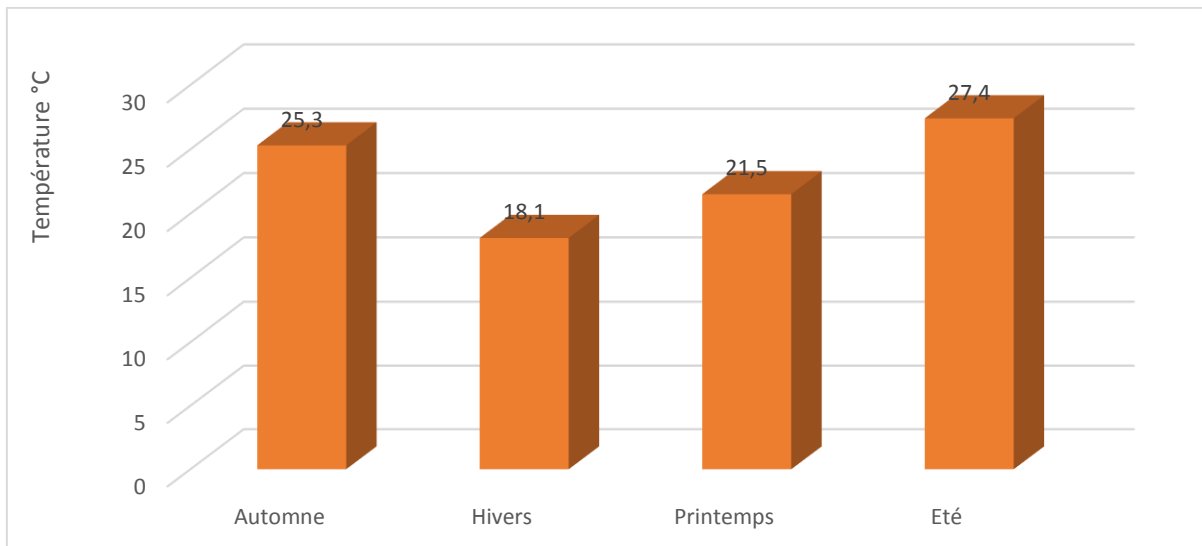


Figure 22 : variation saisonnière des températures de l’air

3. Diagramme ombrothermique de Gaussien

Les diagrammes reliant température et pluie ou diagrammes ombrothermiques, expriment l’importance de la période sèche par rapport à la période humide. Dans le cas de notre région, la comparaison des cinq diagrammes Ombrothermique (Figure 23, 24, 25, 26 et 27) montre que la saison sèche s’étend sur cinq mois, débuté en mois de Mai pour les décennies 1970-1980 et 1990/2000, alors que pour les décennies 1980/1990, 2000/2010 et 2010/2017 la sécheresse s’étend sur plus de six mois, est débuté en mi-mars.

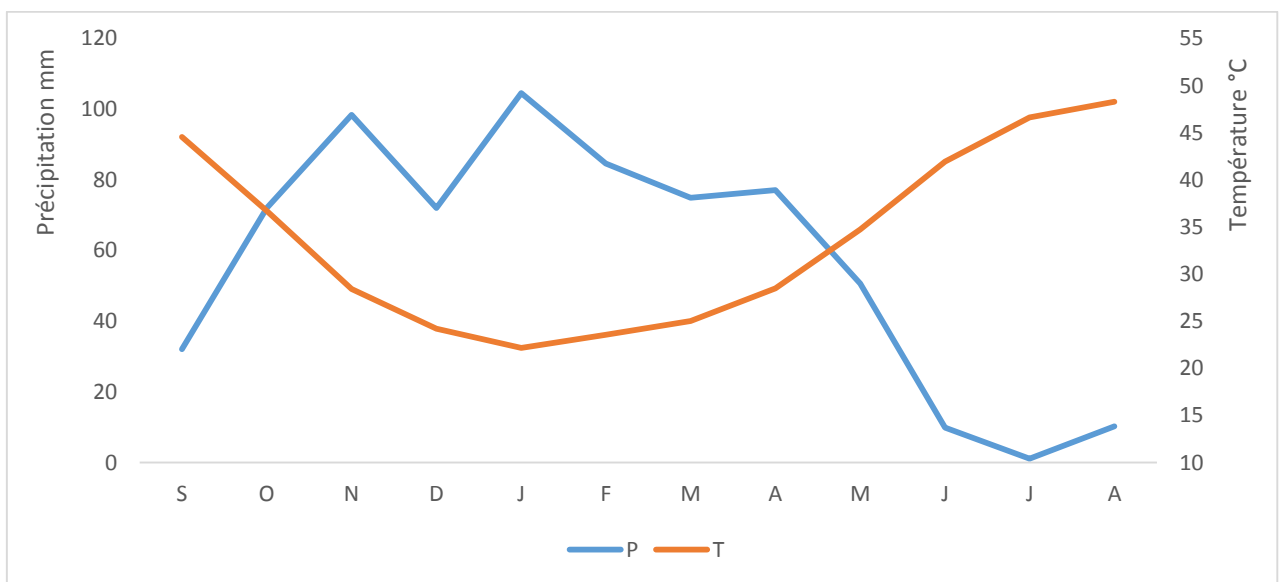


Figure 23: Diagramme ombrothermique de Gaussien (1970-1980)

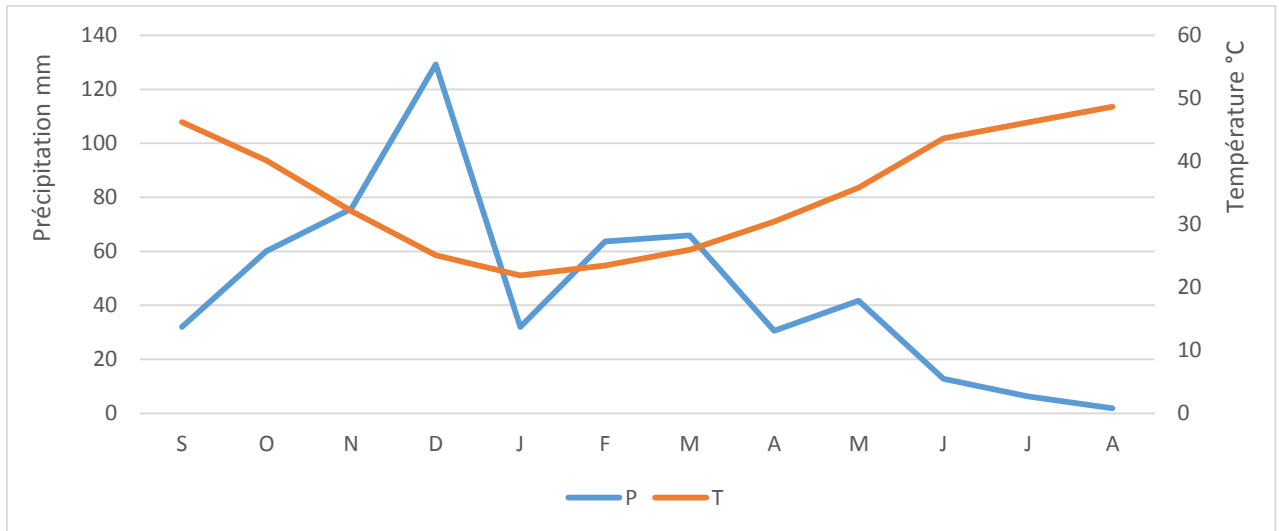


Figure 24: Diagramme ombrothermique de Gaussen (1980-1990)

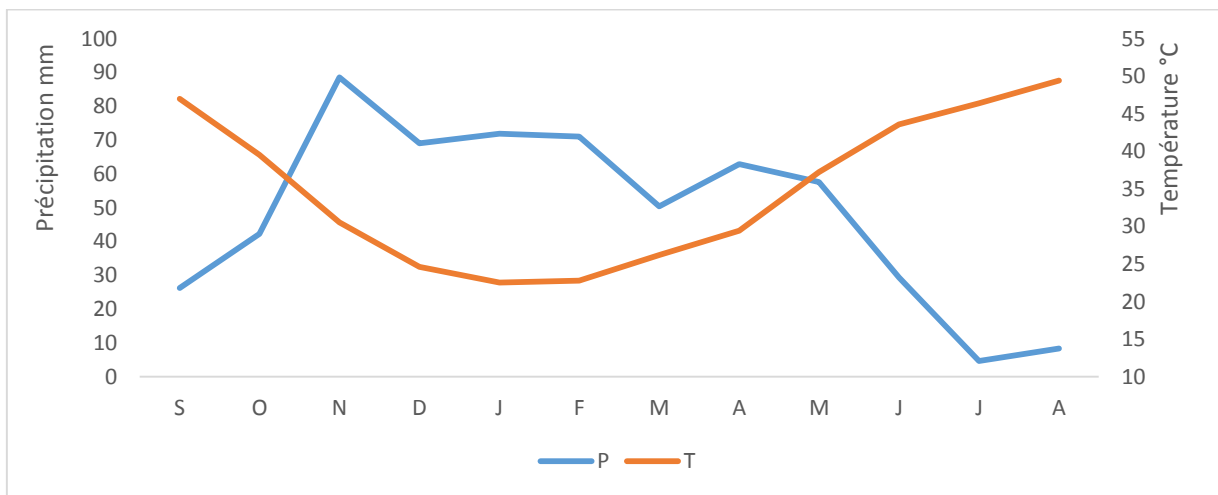


Figure 25: Diagramme ombrothermique de Gaussen (1990-2000)

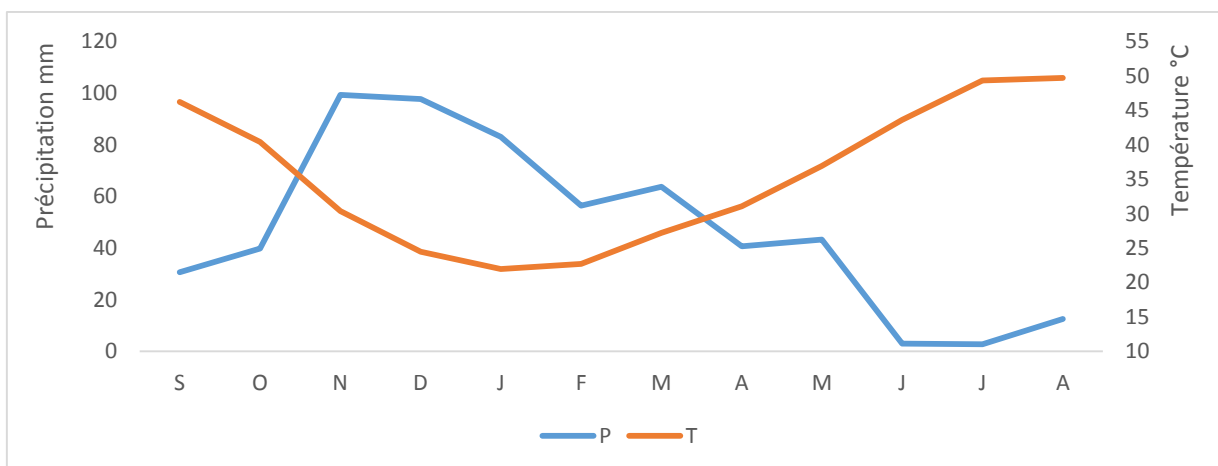


Figure 26: Diagramme ombrothermique de Gaussen (2000-2010)

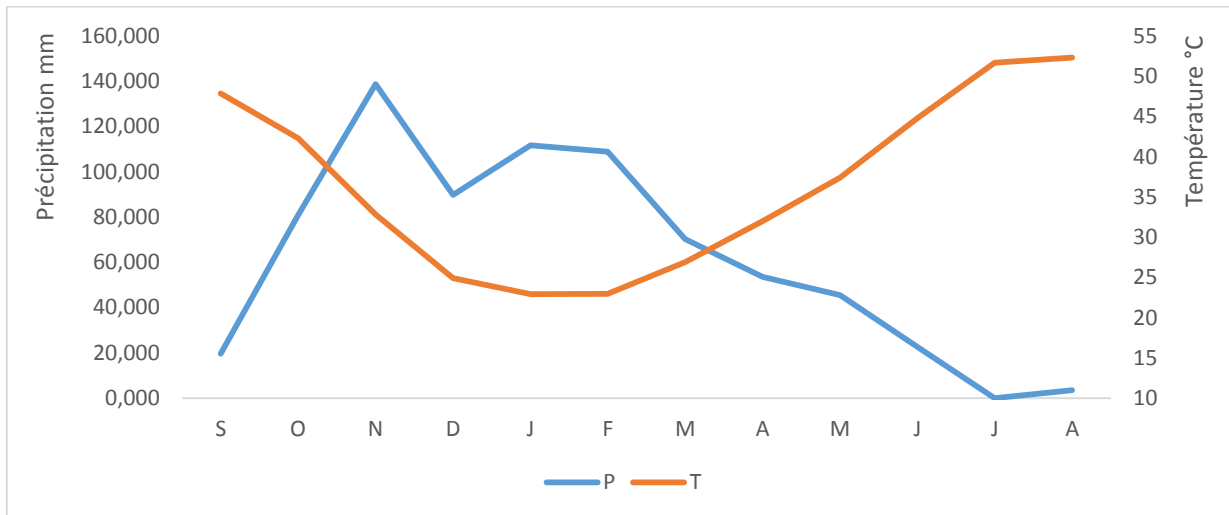


Figure 27: Diagramme ombrothermique de Gaussen (2010-2017)

4. Variations de l'humidité relative de l'air

➤ variation interannuelle

Les variations interannuelles de l'humidité relative sur la période 1970-2017 montrent qu'à Alger (Figure 28), l'humidité est irrégulière.

La valeur moyenne estimée à 73,38%, fluctue entre un minimum de 68,1% durant l'année (2009/2010) et un maximum de 78,4% durant l'année (2003/2004) alors que la moyenne est enregistrée durant les années (1998/1999) et (1999/2000).

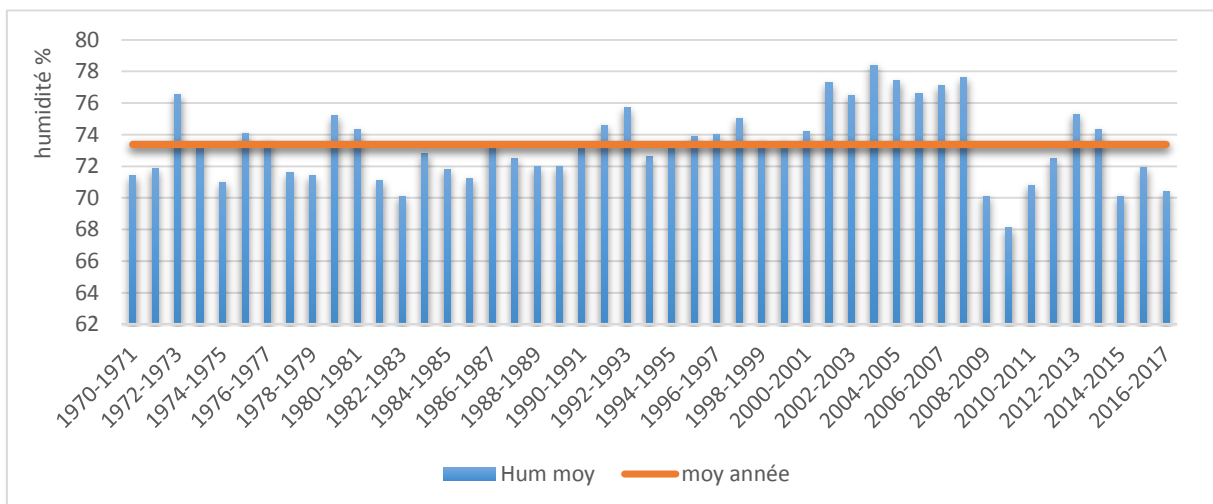


Figure 28 : variation interannuelle de l'humidité de l'air (1970-2017)

➤ **variation mensuelle**

L'analyse de la figure suivante montre :

Les humidités relatives les plus élevées commencent à la fin de l'automne (novembre) jusqu'au mois de mars.

En été, l'humidité relative descend au-dessous de 70% ou elle atteint son minimum en juillet et aout avec 67.9%.

Les maxima sont atteints 77% en hiver.

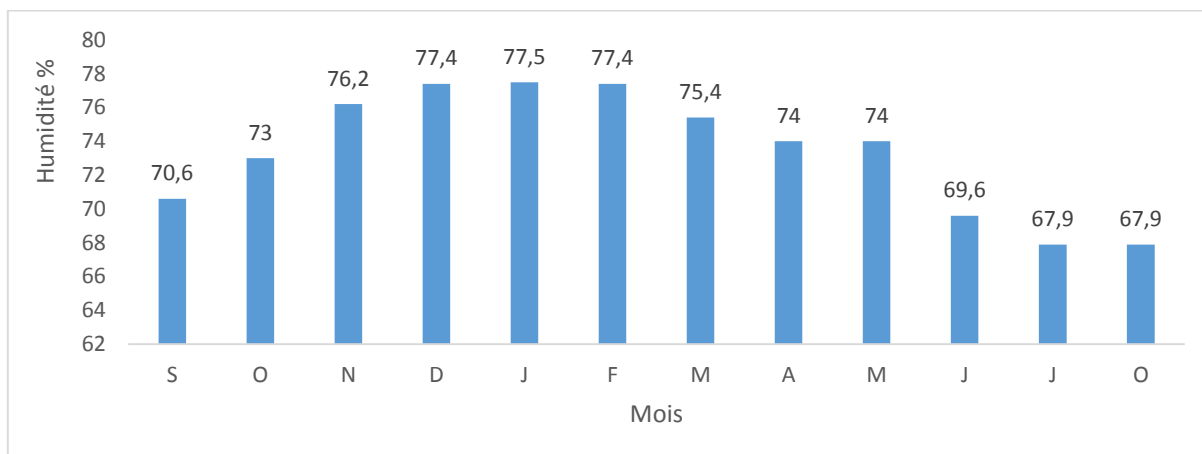


Figure 29 : variation mensuelle de l'humidité de l'air

5. Variation de vent

Le vent est un paramètre qui influence beaucoup sur l'évapotranspiration. Les variations interannuelles de la vitesse de vent montrent que la vitesse de vent varie légèrement pendant toute la période, elle oscille entre 2,1m/s et 3,8 m/s.

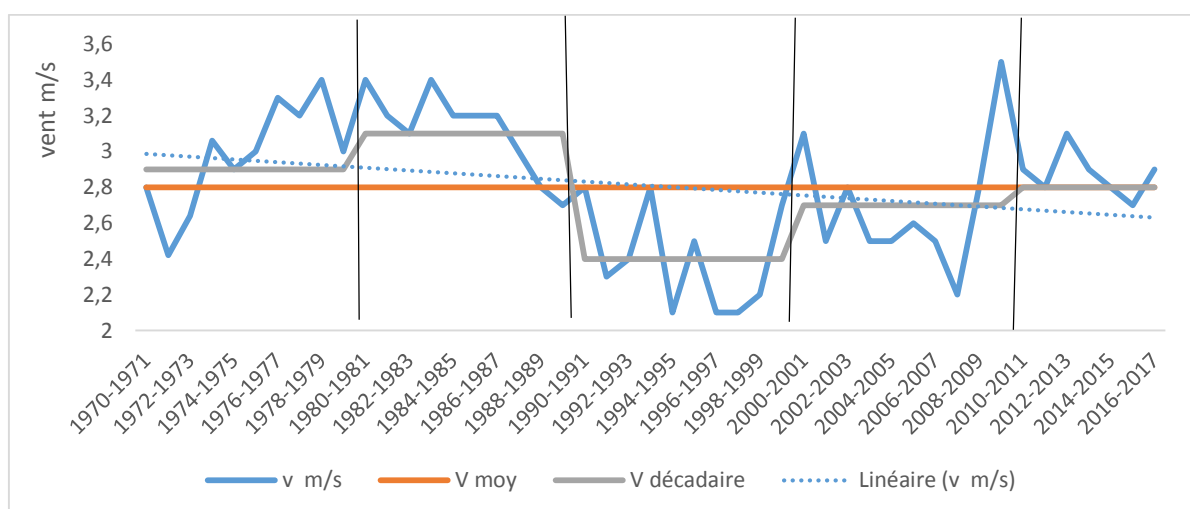


Figure 30 : variation interannuelle de la vitesse de vent (1970-2017)

6. Variation de l'insolation

La figure suivante donne les durées de l'insolation, c'est-à-dire la période durant laquelle le soleil a brillé.

La période 1970-2017 commence par deux décennies (1970/1971-1990/1991) peut ensoleillée en général, suivie d'une décennie bien ensoleillée (1990/1991-2000/2001), suivie d'une décennie normale (2000/2001-2010/2011), et se termine par une décennie bien ensoleillée (2010/2011-2016/2017)).

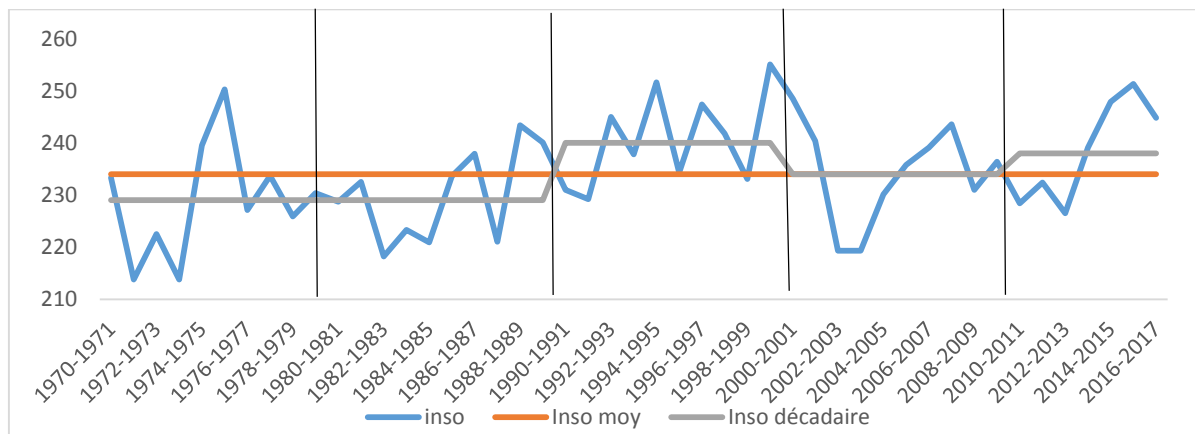


Figure 31 : variation interannuelle de la durée de l'insolation (1970-2017)

D'après la figure32, on remarque que l'insolation décroît de l'été ou elle atteint la valeur la plus élevée 335 h (juillet) à l'hiver ou elle atteint son minimum 156,5h (décembre).

En somme, la région d'Alger est bien ensoleillée, avec une moyenne mensuelle de 234,1 heures, soit 2809,2 h/an.

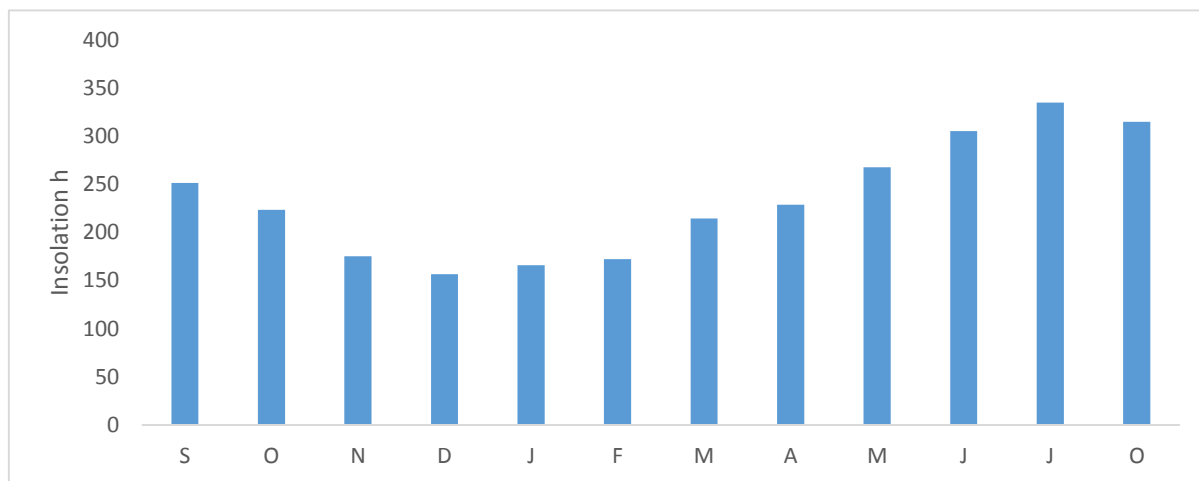


Figure 32 : variation mensuelle de la durée de l'insolation (1970-2017)

Après le traitement des données climatiques de la région étudiée nous avons choisi les périodes pour la simulation avec Aquacrop la première sèche (2000-2009), et la deuxième humide (2010-2017)

II. Résultats de la simulation

1. Estimation de l'évapotranspiration de référence selon le modèle Aquacrop

Dans cette région, la valeur moyenne estimée à 432,33 mm, fluctue entre 523 mm et 363 mm. Par ailleurs, on constate que l'ET observé durant la décennie (2010/2017) est plus que l'ET observé durant la décennie (2000/2009). Cette augmentation est due en raison de l'élévation des températures durant cette décennie –là.

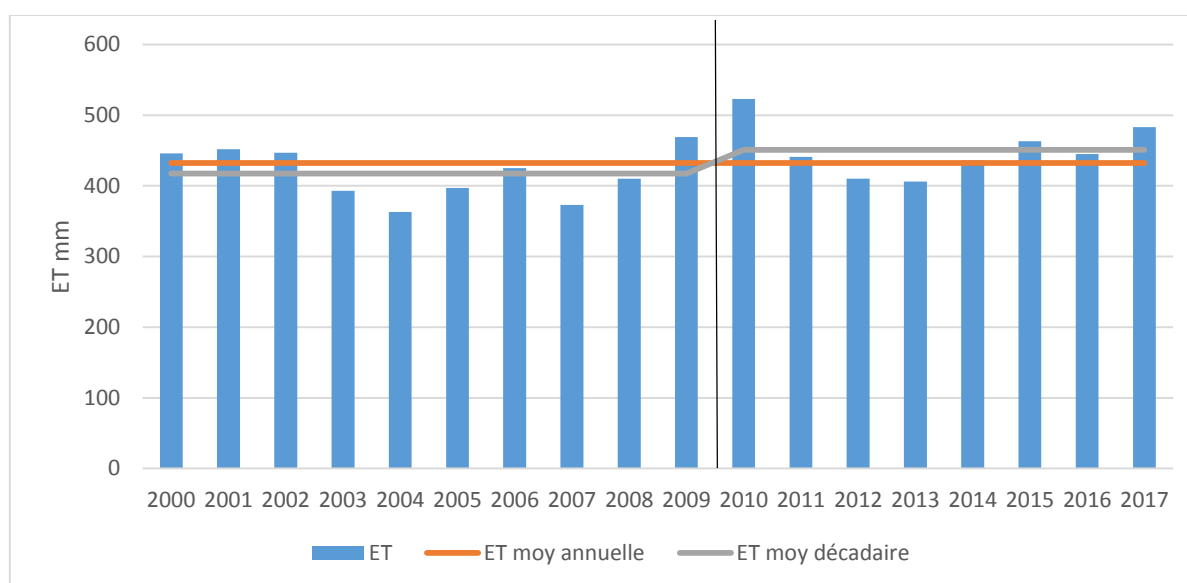


Figure 33 : variation interannuelle de l'évapotranspiration

2. Estimation du besoin en eau de la pomme de terre et la tomate selon le modèle Aquacrop

Les résultats sont présentés dans le graphique 34. Globalement, le besoin en eau de la pomme de terre et la tomate est plus important durant la décennie 2010/2017 qu'en décennie 2000/2009, avec 440,25 mm et 410 mm respectivement pour la pomme de terre, tandis que pour la tomate 747,8 mm et 689,7 mm respectivement. Ces résultats sont expliqués par les températures enregistrées durant cette période qui sont plus élevées que l'autre. Cette dernière a un effet direct sur l'évapotranspiration et ultimement agit sur les besoins en eau des cultures.

Nous pouvons également noter que, le besoin en eau de la tomate est plus élevé que la pomme de terre, car dans leurs compositions, pour 100g l'eau représente 94g pour la tomate, tandis que pour la pomme de terre il représente 77g.

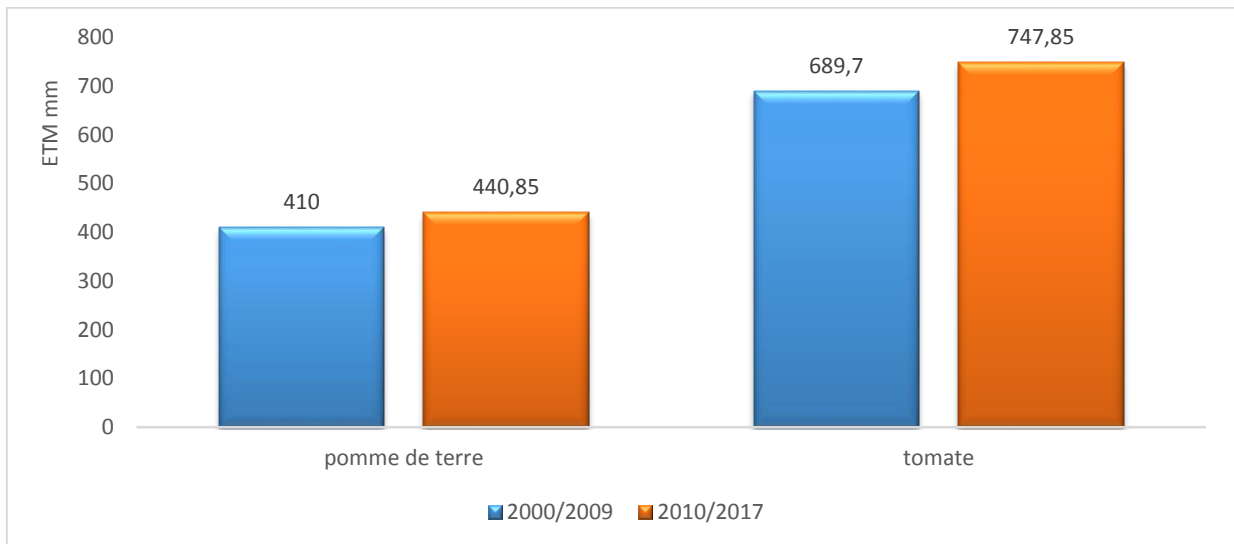


Figure 34 : Estimation du besoin en eau de la pomme de terre et la tomate.

L'étude de la figure suivante montre que, les besoins en eau de la pomme de terre varient en cours des stades phénologiques de la culture.

1. Germination et croissance (février et mars) : dont l'ETM sont faibles (moins de 85 mm), pour qu'elles ne puissent pas causer la pourriture des organes de reproductions, et limiter le développement racinaire.
2. Tubérisation (avril et mai) ; ETM très élevées (entre 120mm et 150 mm) car c'est le moment de formation des stolons et des tubercules.
3. Maturation (juin), ETM minimales (moins de 22 mm).

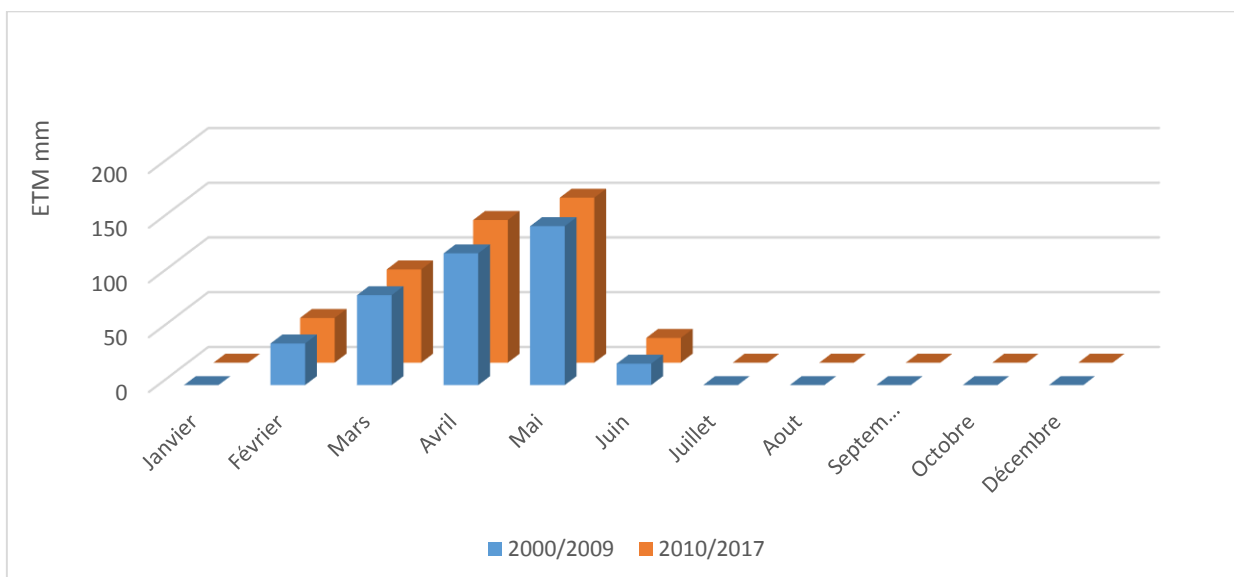


Figure 35 : estimation mensuelle des besoins en eau de la pomme de terre

La figure suivante indique que les besoins en eau de la tomate liés avec leur cycle végétatif. La croissance végétative (mai-juin), les besoins en eau sont peu élevés (41 % des besoins globaux en eau). La floraison, les besoins en eau sont plus élevés (52 % des besoins globaux). En fin la maturation (septembre), les besoins en eau se réduisent (7 % des besoins globaux).

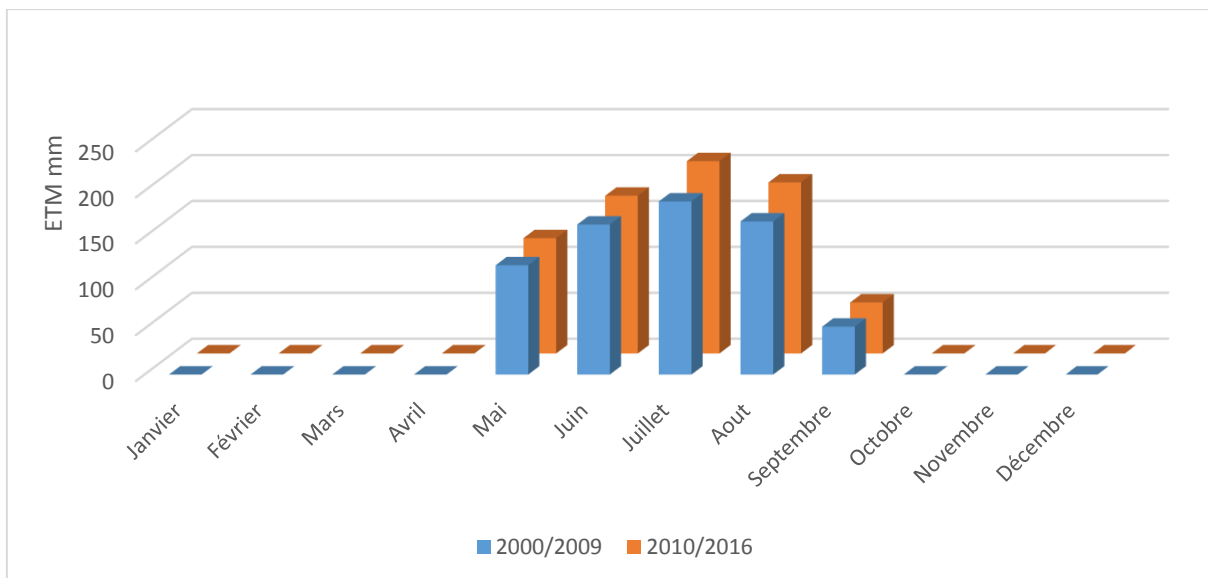


Figure 36 : estimation mensuelle des besoins en eau de la tomate

3. Estimation du besoin d’irrigation de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop

Les résultats présentés dans la figure 37 (A et B), montrent que les besoins d’irrigations de la pomme de terre et la tomate sont différents durant les deux périodes (2000/2009) et (2010/2017), elles sont 239mm et 227.5 mm respectivement pour la pomme de terre, tandis que pour la tomate sont 580 mm et 630 mm respectivement. Cette variation est en fonction de la pluie efficace. Lorsque les besoins en eau ne sont pas satisfaits par la pluie, l’irrigation devient nécessaire, et ce d’autant plus que la sensibilité de la culture au manque d’eau pendant une période donnée est élevée.

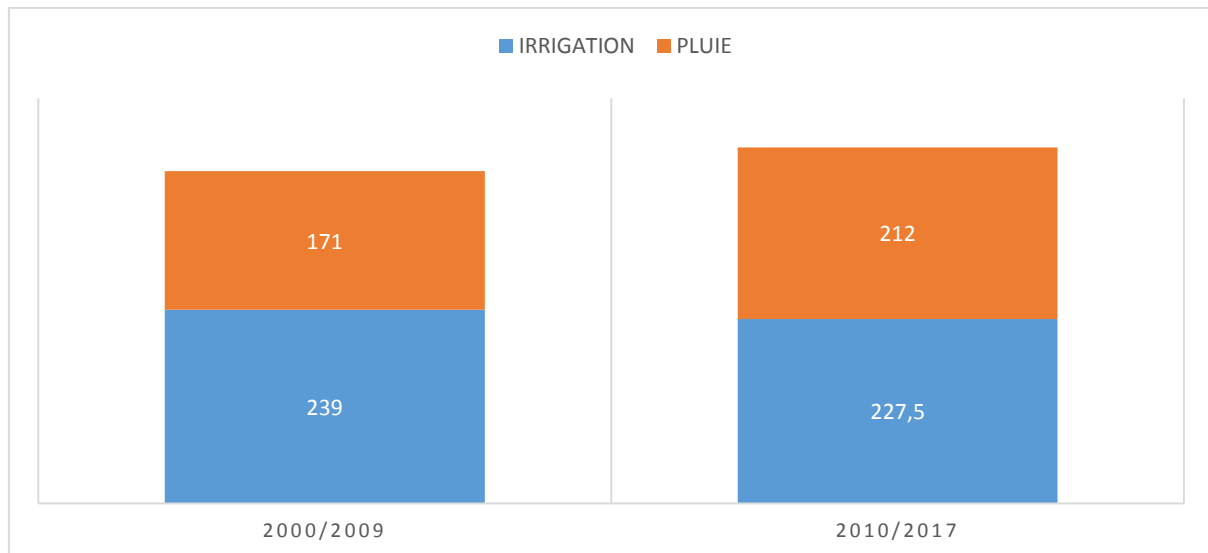


Figure 37 A : Estimation du besoin d'irrigation de la pomme de terre

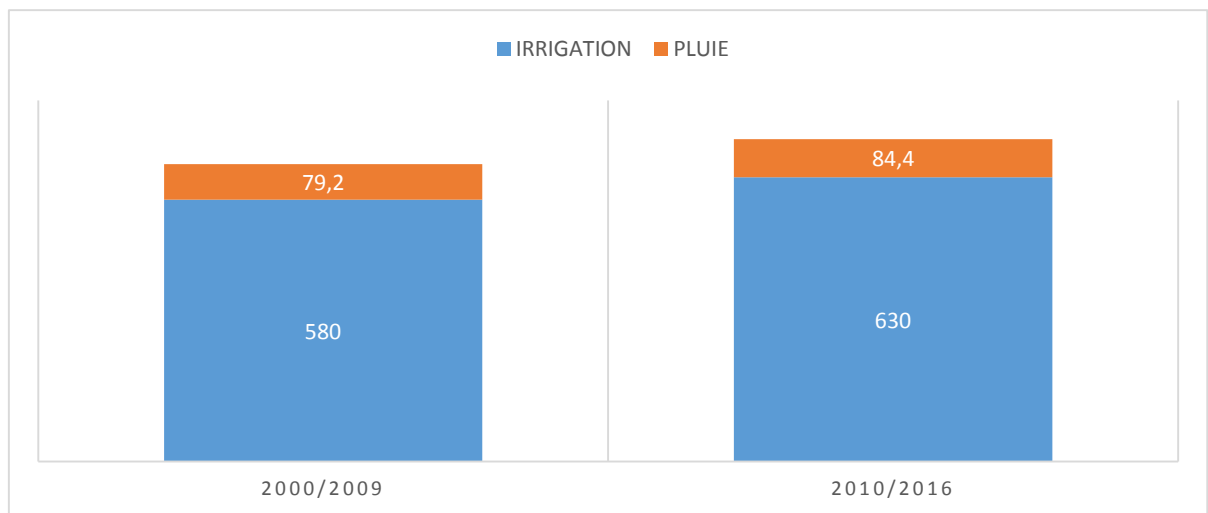


Figure 37 B : Estimation du besoin d'irrigation de la tomate

La figure 38 donne les apports d'eau effectués en irrigation par rapport à la pluie efficace pour la pomme de terre. Pendant le mois de février, la pluviométrie enregistrée a été de 26,39 mm et 40, 81 mm et les apports d'eau sont nuls, car pendant cette phase la plante n'est pas sensible à un déficit hydrique (Bekraoui & Skiredj, 1997). tandis que, les apports d'eau les plus élevés 103 mm (2000/2009) et 112.3 mm (2010/2017) a été effectuée au niveau du mois mai ou la pluviométrie n'a pas dépassé 43 mm.

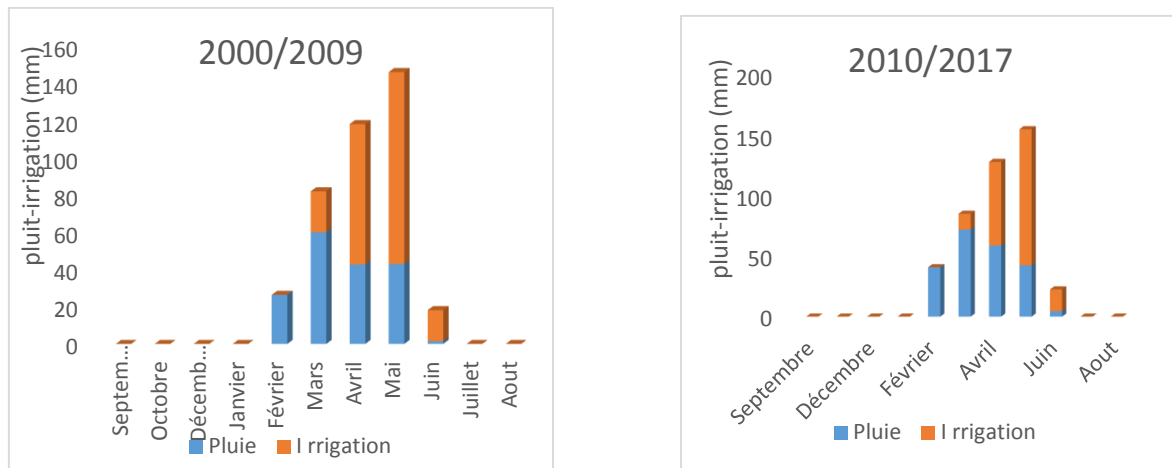


Figure 38 : estimation des besoins d'irrigation mensuelle de la pomme de terre

La figure 39 donne les apports d'eau effectués en irrigation par rapport à la pluie efficace pour la tomate. On remarque que, les apports d'eau par irrigation sont plus élevés pendant tous les mois de cycle végétatif, car la plantation se déroule pendant la période estivale où la pluviométrie ne dépasse pas 44 mm pour les deux périodes.

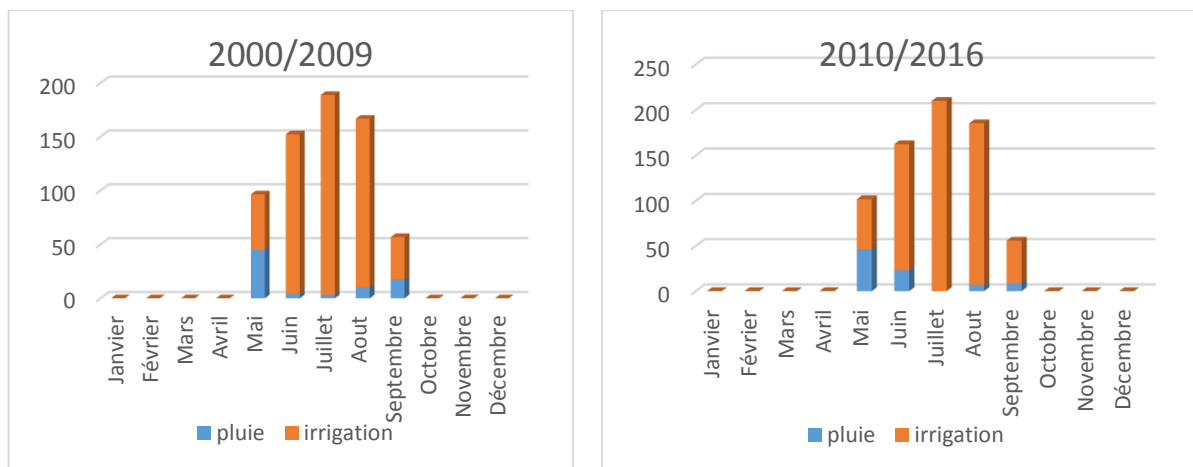


Figure 39 : estimation des besoins d'irrigation mensuelle de la tomate

4. Estimation de la transpiration de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop

Les résultats de la simulation (figure 40 A et B), se révèlent que les pertes par transpiration, sont variées entre 219 mm (2004) et 285 mm (2015) pour la pomme de terre. Cependant, pour la tomate sont entre mm (2004) et 796 mm (2015).

Cette variation est due par les facteurs climatiques, notamment les températures de l'air, une augmentation de la température provoque une augmentation de l'ouverture des stomates, donc l'augmentation de la transpiration, et en sens opposé, à une fermeture stomatique donc diminution de la transpiration. Au-delà de 25 à 30°C, elle provoque la fermeture des stomates et donc une diminution de la transpiration.

Ainsi, le deuxième facteur qui agit beaucoup plus sur la transpiration est le vent, quand ce dernier augmente donc le dessèchement de l'air. Le changement d'air autour de la plante plus fréquent favorise l'évaporation de l'eau. Puis, la différence de potentiels hydriques entre les milieux, interne et externe, est augmentée, ce qui accroît alors tout de suite la transpiration.

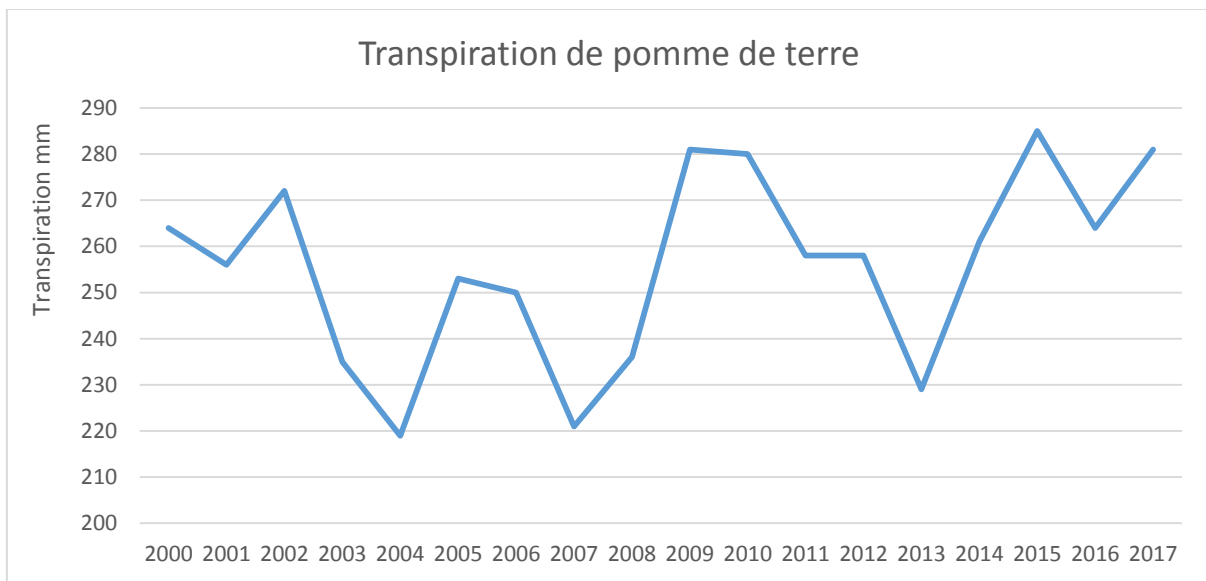


Figure 40 A : variation de la transpiration de la pomme de terre

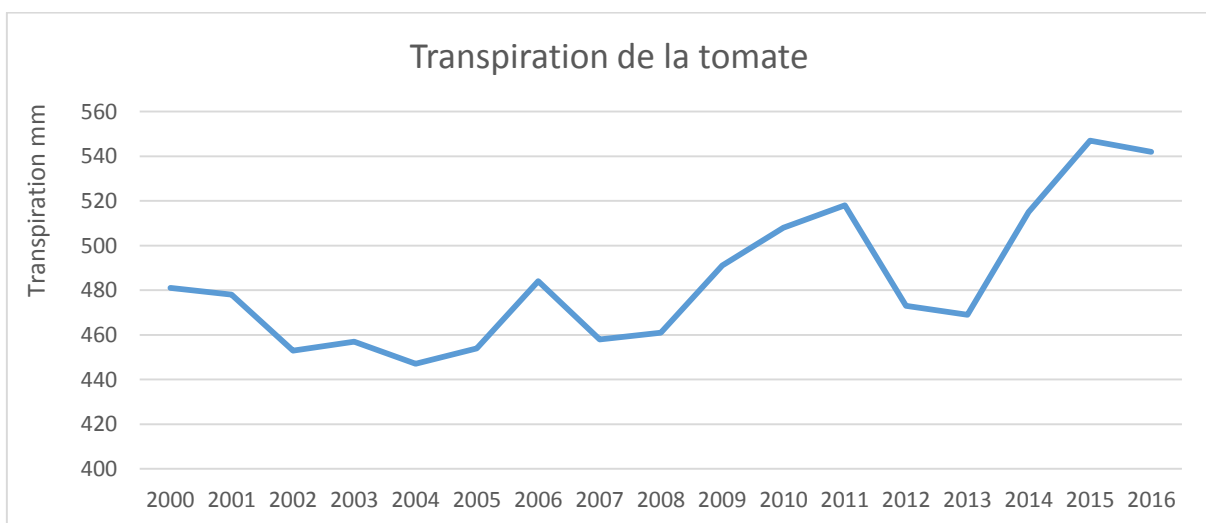


Figure 40 B : variation de la transpiration de la tomate

5. Estimation de la biomasse de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop

Les résultats de la simulation présentés dans la figure 41, montrent qu'il y a une augmentation progressive, durant les deux dernières décennies jusqu'à atteindre la valeur de la biomasse la plus élevée qui est de 11,7 t/ha pour la pomme de terre et 16,1 t/ha pour la tomate en 2016. Cette augmentation est expliquée par la croissance continue remarquable de la teneur en CO₂ de l'air qui est limitant pour la photosynthèse des plantes en C₃ donc il y a une augmentation de leur biomasse. Cette dernière elle est un bon indicateur de l'activité photosynthétique.

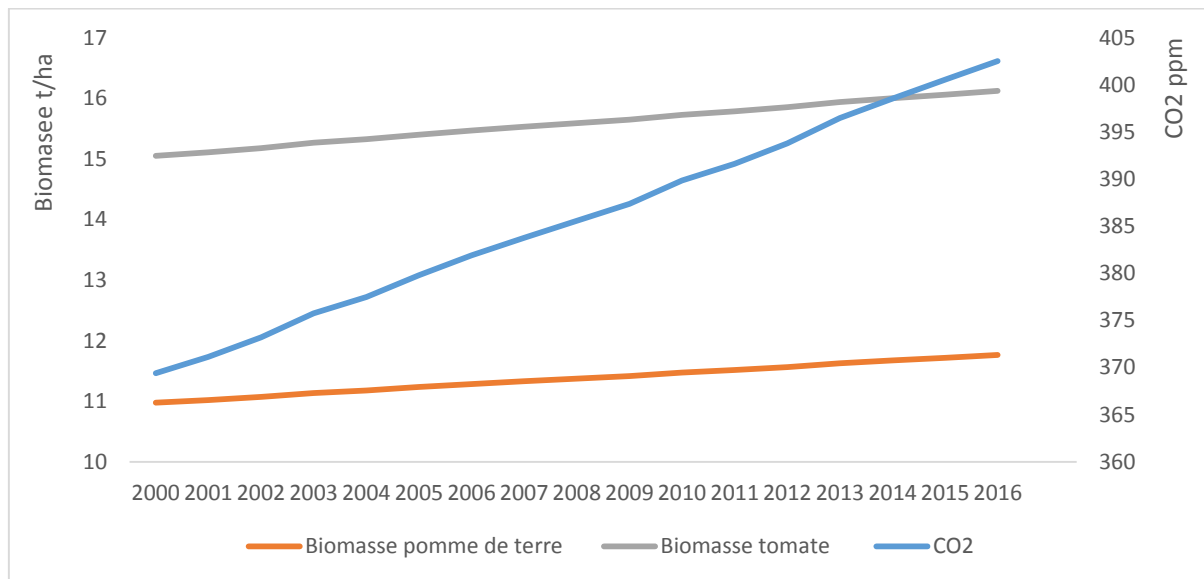


Figure 41 : évolution de la biomasse de pomme de terre et tomate

6. Estimation de la productivité de l'eau de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop

Les résultats de la simulation présentés dans la figure 42 (A et B), montrent qu'il y a une forte relation inverse entre la productivité de l'eau et la transpiration durant toute la période étudiée. L'effet général d'une température plus haute, conduisant à une demande évaporatoire plus intense, et par conséquent l'efficacité d'utilisation de l'eau (le rendement par unité de transpiration) réduit, donc en résulte que la production d'eau des cultures est régie par la transpiration.

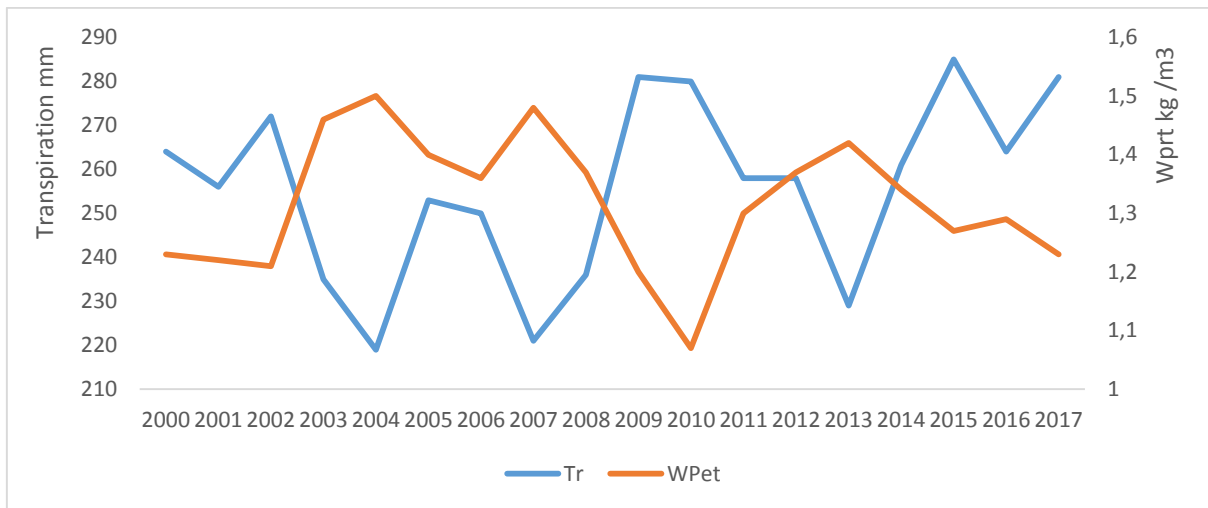


Figure 42 A : variation de la productivité de l'eau de la pomme de terre

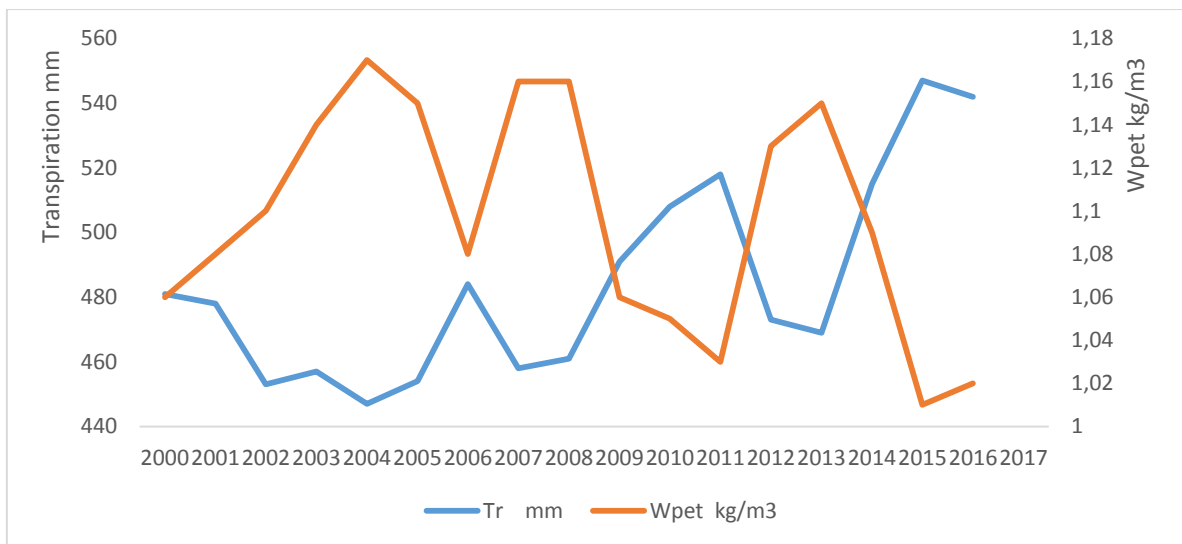


Figure 42 B : variation de la productivité de l'eau de la tomate

7. Estimation du rendement de la pomme de terre et la tomate selon le model Aquacrop

La figure 43 montre que les résultats de la simulation du modèle pour le rendement n'été pas Similaire aux résultats du rendement réel pour les deux cultures. Le coefficient de corrélation entre le rendement simulée et le rendement réel était faible, il est ($R_2 = 0,37$) pour la pomme de terre. Tandis que, pour la tomate était $R_2 = 0,13$.

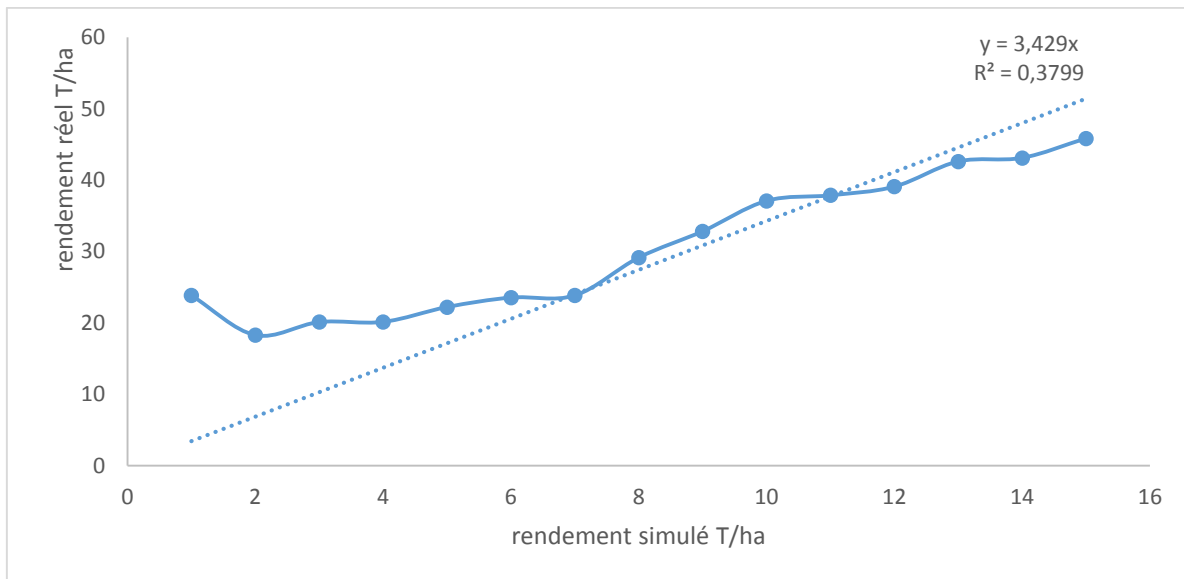


Figure 43 A : Comparaison du rendement simulée et du rendement observée dans la pomme de terre

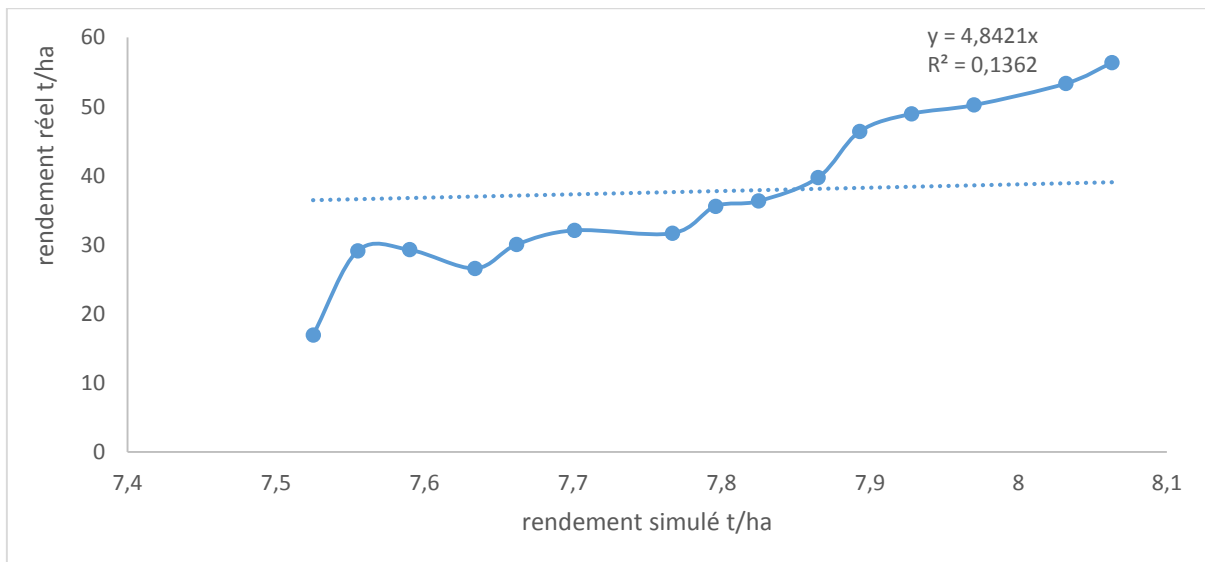


Figure 43 B : Comparaison du rendement simulée et du rendement observée dans la tomate

8. Estimation des besoins en eau de la tomate selon le model Aquacrop avec un scénario sur les changements climatiques

Nous avons fait une simulation d'un scénario du changement de climat sur la culture de tomate, nous avons ajouté 3°C à la température réelle de l'air. Les résultats montrent qu'il y'a une augmentation de 58,15 mm des besoins en eau de tomate par rapport à la première simulation.

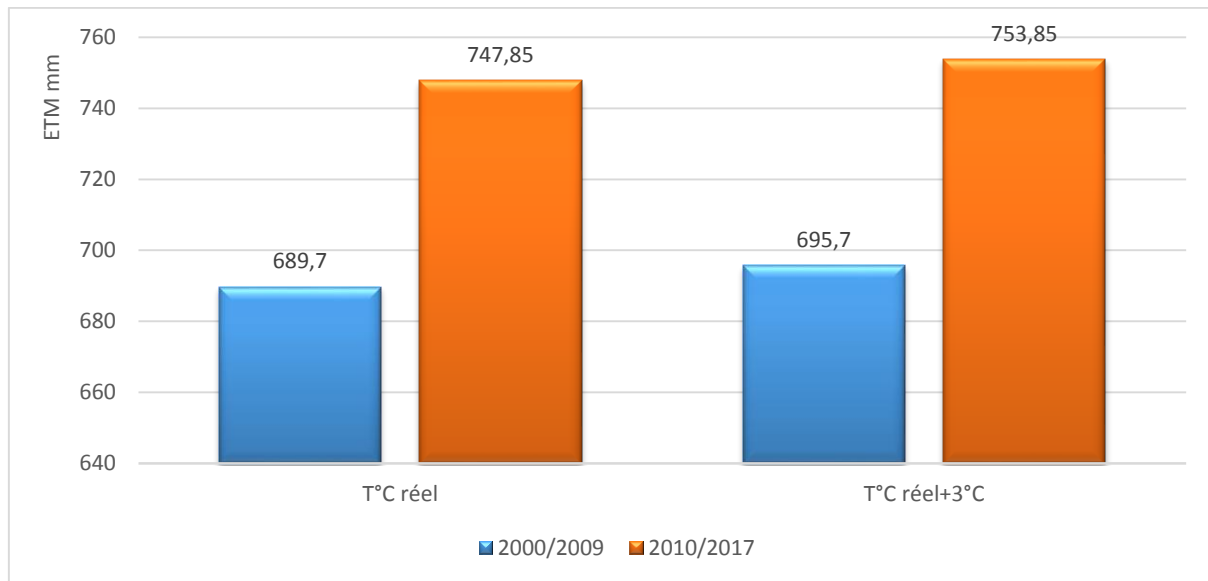


Figure 44 : Estimation du besoin en eau de la tomate avec un scénario sur les changements climatiques

En théorie, avec ces changements on attend que les pertes par transpiration croîtront avec des températures et CO₂ de l'air plus élevées. Car, en effet il y a des interactions entre le dioxyde de carbone et la température dans la croissance végétative (c'est-à-dire que l'effet du CO₂ est plus grand quand il fait plus chaud que plus froid). donc les hausses de température dans un monde enrichi en CO₂ augmenteraient la productivité globale de biomasse des cultures végétatives. Cependant, nos résultats ont montré le contraire, une augmentation de la température conduit la baisse de biomasse, cet abaissement est causé par : Les températures ont dépassé le seuil de 25°C, donc comme nous avons dit auparavant, au-delà de 25 à 30°C, elle provoque la fermeture des stomates, et donc une diminution de la transpiration, et par conséquent la baisse de la biomasse de tomate.

Conclusion

La wilaya d'Alger qui a fait l'objet de notre étude présente des conditions du sol et de climat favorables dans leur ensemble à l'agriculture. Avec une précipitation moyenne annuelle de 627 mm, et un total annuel d'ET0 de 707.1 mm, la wilaya accuse un déficit pluviométrique annuel de 80.1 mm.

Dans notre travail nous avons essayé d'approcher la demande par la détermination de besoins en eau par le modèle de la productivité de l'eau « Aquacrop » pour deux périodes déférente la première déficitaire et la deuxième excédentaire, les résultats qui a été obtenu sont le besoin en eau de la pomme de terre et la tomate est plus important durant la décennie 2010/2017 qu'en décennie 2000/2009, avec 440,25 mm et 410 mm respectivement pour la pomme de terre, tandis que pour la tomate 747,8mm et 689,7mm respectivement. Ces besoins sont réparti au coure de stade phrénologique de la culture.

Selon les résultats obtenus, on peut dire que la simulation du besoin en eau, de la biomasse et de la productivité de l'eau par le modèle AquaCrop a été acceptable par rapport à les valeurs réelles, mais il ne pouvait pas simuler le rendement de manière optimal.

Des travaux sur le terrain doivent être réalisés pour suivre de près l'agriculteur, à fin d'évaluer les doses réelles, et leur uniformité d'application. Le diagnostic de la conduite des irrigations est nécessaire pour mieux maîtriser l'irrigation et pouvoir apporter des conseils pratiques.

Enfin, il faut être davantage conscient que la gestion rationnelle des eaux a des retombées concrètes, en particulier la viabilité socio-économique, cet objectif est réalisable si toutes les parties conjuguent leurs efforts.

Dans le contexte actuel de rareté de la ressource en eau, les agriculteurs doivent être encouragé 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.

- **Allen R.G., Pereira, L.S., Howeli. T et Jensen M., 2011:** Evapotranspiration information reporting: Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management* 98 (6), pp. 899- 920.
- Abd El Moneim Hassen., 1999 :** Production de pomme de terre. Maison. Arabe de l'édition et la distribution. 446 p (en arabe).
- Allen R.G., Pereira, L.S., Raes, D., et Smith, M., 1998:** Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome, Italy, 300p.
- ANDI., 2013 :** Agence Nationale de Développement de l'Investissement.
- ANRH., 2014 :** Ministère des Ressources en EAU Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Direction Regionale Alger, Juin 2018.
- Araya A., Habtu S., Hadgu K.M., Kebede A. and Dejene, T. (2010).** Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agric. Water Manage.* 97 : 1838–1846.
- **Bekraoui A. & Skiredj A. (1997)** Comportement de la culture de pomme de terre au stress hydrique et importance de l'irrigation d'appoint aux Doukkala. *Actes Inst. Vet. (Maroc)* 17 (4): 267-278.
- **Beltrando G., et Chémery- BISSATI S., 1996:** Optimisation de la cryoconservation d'apex de *Solanum phureja* par enrobage-déshydratation, en présence de saccharose. Etude sur l'effet de différentes substances cryoprotectrices. Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1. France. 107p.
- Benabdelouahab T., 2015.** Using remote sensing (optical and radar) and modeling to support the irrigation management of cereals in a semi-arid region: a case study of the Tadla irrigated perimeter in Morocco. Thèse de doctorat présentée pour la faculté des sciences, Université de Liège. 157p
- **Booher L. 1974.** Biologic utilizations of unmodified and modified food starches. *J. Nutr.*, 45, 75-95.
- **Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Sinoquet, H., 2003.** An overview of the crop model stics. *Eur. J. Agron.* 18 (3–4), 309–332. [http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7).
- Calanca P., Holzkamper A., 2010 :** Conditions agro-météorologiques du Plateau suisse de 1864 à 2050. *Recherche Agronomique Suisse* 1(9), pp. 320-325.
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H., 1979.** Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper* 33. FAO, Rome, Italy, 193 pp.

- **Duchemin, B., Fieuzal, R., Rivera, M.A., Ezzahar, J., Jarlan, L., Rodriguez, J.C., Watts, C., 2015.** Impact of sowing date on yield and water use efficiency of wheat analyzed through spatial modeling and Formosat-2 images. *Remote Sens.* 7 (5), 5951–5979. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70505951>.
- **Calanca P., Smith P., Holzkamper A., et Ammann., C., 2011 :** L'évapotranspiration de référence et son application en agrométéorologie. *Recherche Agronomique Suisse* 2 (4), pp. 176–183.
- **Casadebaig, P., Guillioni, L., Lecoeur, J., Christophe, A., Champolivier, L., Debaeke, P., 2011.** SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of the sunflower crop in contrasting environments. *Agric. For. Meteorol.* 151 (2), 163–178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.012>.
- **Charles R., 1975 :** La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. ORSTOM. Paris: pp 27-67.
- **Daalen, J. C. & Shugart, H. H. 1989.** OUTENIQUA – A computer model to simulate succession in the mixed evergreen forests of the southern Cape, South Africa. *Landscape Ecology*, 2, 255-267.
- **Diop M., 2009 :** Les bilans hydriques dans la moyenne vallée du Sénégal, contribution à l'étude des besoins en eau de la végétation. Thèse de l'Université Paris 1 Pantheon – Sorbonne. 373 p.
- **Dong, J., Kaufmann, R.K., Myneni, R.B., Tucker, C.J., Kauppi, P.E., Liski, J., ... Hughes, M.K., 2003.** Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sens. Environ.* 84 (3), 393–410. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00130-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00130-X).
- **Dreux P., 1980 -** Précis d'écologie. Ed. Presses universitaires de France, Paris, 231 p
- **Dubost D., 1992 :** Aridité, agriculture et développement : le cas des oasis algériennes .In sécheresse no 2. vol. 3.
- **Duchemin, B., Maisongrande, P., Boulet, G., Benhadj, I., 2008.** A simple algorithm for yield estimates: evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. *Environ. Model. Softw.* 23 (7), 876–892. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.10.003>.
- **Dyke, P.T., Kiniry, J.R., Jones, C.A., 1986.** CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station Retrieved from <http://catalog.hathitrust.org/Record/000810137>.

- Er-raki S., 2007** : Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, expérimentation et télédétection, Thèse de doctorat en Mécanique des Fluides et Energétique -Télédétection, Faculté des Sciences Marrakech, 112 p.
- Estienne P et al, 1970** : Climatologie Librairie Armand Colin, édition collection U.
- Gond V., et Bartholome E., 2004** : Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarquée sur SPOT-4. International Journal of Remote Sensing, **vol. 25**, no. **5**, pp. 987–1004
- Henia L., 1993** : Climat et bilan de l'eau en Tunisie : Essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques, Publications de l'Université de Tunis, 391p.
- Hufty, A.2001**: introduction à la climatologie. Laval : editions DeBoeck Université.
- **Hadibi A., Chekired-Bouras F.Z. et Mouhouche B., 2008**. Analyse de la mise en œuvre du plan national de développement agricole dans la première tranche du périmètre de la Mitidja Ouest, Algérie. Hartani T., Douaoui A., Kuper M. Economies d'eau en système irrigué au Maghreb, May 2008, Mostaganem, Algeria. Cirad, 9 p., Colloque- CD-rom. <http://hal.cirad.fr/cirad-00366483/document>.
- **Hawkes, J. G. 1990**. The potato: Evolution, biodiversity & genetic resources. Smithsonian Institution Press, Washington, D.C.
- **Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Brooking, I.R., Francis, G.S., 1998**. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. Eur. J. Agron. 8 (3–4), 161–179. [http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00020-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00020-3).
- Lacoeur J., 2007** : influence d'un déficit hydrique sur le fonctionnement d'un couvert végétal cultivé. Supargo. Montpellier. 12 p.
- **M.A.D.R, 20017**: Ministère d'Agriculture et Développement Rural.
- **Maas, S.J., 1993**. Parameterized model of gramineous crop growth: I. Leaf area and dry mass simulation. Agron. J. 85 (2), 348–353. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500020034x>.
- **Madec P et Perennec P., 1962**: Les relations entre l'induction de la tubérisation et la croissance chez la pomme de terre. Ann. Physio. Veg pp 05-83.
- **Madec P, 1966**: Croissance et tubérisation de la pomme de terre. Bull. soc. Fr. Physio. Veg (12) .pp 159-173.
- **Mailhol, J.C., Olufayo, A.A., Ruelle, P., 1997**. Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. Agric. Water Manag. 35 (1–2), 167–182. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(97\)00029-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(97)00029-2).
- **Moule C., 1972**: Plantes sarclées et déverses. J-B. Ballière et Fils, Editeur, Paris. 246 p.

- **Nana, E., Corbari, C., Bocchiola, D., 2014.** A model for crop yield and water footprint assessment: study of maize in the Po valley. *Agric. Syst.* 127, 139–149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2014.03.006>.
- Nedjraoui D. et Bedrani S., 2008 :** La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte. *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 8 Numéro 1 | <http://vertigo.revues.org/5375>.
- OECD1997:** Consensus document on the biology of *Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum* (potato) Pages 38. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
- Oiganji E. , Igbadun H.E., Mudiare O.J & Oyebode M.A., 2016.** Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in Northern zone of Nigeria. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 18, n°3. 14p.
- Perrier A., et Tuzet A., 1998:** Approche théorique du continuum sol-plante-atmosphère. In, J.R Tiercelin (Editor). *Traité d'irrigation*. Lavoisier Tec et Doc. Paris, pp 112-146.
- **Pernnec P, Madec P., 1980:** Age physiologique du plant de pomme de terre. Incidence sur la germination et répercussion sur le comportement des plantes. *Potato Res.*, 23,183-199.
- **Perrier, A, 1988 ;** Les besoins en eau des cultures : analyse et application. 1.Bases conceptuelles de l'analyse des besoins. Dans *Traité d'irrigation*. Tiercelin J.R. a Lavoisier. Paris. 147-162p.
- **Porter, J.R., 1993.** AFRCWHEAT2: a model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *Eur. J. Agron.* 2 (2), 69–82. [http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301\(14\)80136-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301(14)80136-6).
- Rana G., and Katerji N., 2000 :** Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*,**13**, pp 125-153.
- **Shukla, J. and Minz, Y. 1982.** Influence of the land surface evapotraspiration on the earth's climate. *Science* **215**: 1077-1099
- **Singh, U., Thornton, P.K. 1998.** Using Crop Models for Sustainability and Environmental Quality Assessment Outlook on Agriculture 21 209-218.
- **Soltner D., 1979:** Les grandes productions végétales phytotechnie spéciale. 10^{ème}. Edition. 427 p.
- Seltzer P, 1946 :** Le climat de l'Algerie. Alger. Carbonel.1946 ; .219.
- Sorre, M, 1943 :** Les fondements biologiques à la géographie humaine. Paris : Armand Colin.

- Spooner, D. M. and Knapp, S. 2013.** Potato systematics and germplasm collecting, 1989–2000. *American Journal of Potato Research* 78(4):237-268.
- **Thorntwaite, C.W., 1948.** "An approach toward a rational classification of climate". *Geographical Review*, 38 (1), 55-94. doi:10.2307/210739.
- Toumia J., Er-Rakib S., Ezzaharc J., Khabbaa S., Jarlan L., Chehbounid A., 2015.** Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, vol 163. p. 219 – 235.
- **Tucker, C.J., Sellers, P.J., 1986.** Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Remote Sens.* 7 (11), 1395–1416. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168608948944>.
- **van Keulen, H., Seligman, N.G., 1987.** Simulation of Water Use, Nitrogen Nutrition and Growth of a Spring Wheat Crop. *Pudoc*.
- **van Laar, H.H., Goudriaan, J., van Keulen, H., 1992.** Simulation of Crop Growth for Potential and Water - Limited Production Situations: As Applied to Spring Wheat (p. 72 pp) Wageningen, CABO-DLO Retrieved from <http://edepot.wur.nl/359573>.
- Van Ittersum M.K., Leffelaar P.A., Van Keulen H., Kropff M.J., Bastiaans L. and Goudriaan J., (2003).** On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Eur. J. Agron.* 18 (3–4), 201–234. Second Special Issue “Proceedings of the 2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems, Florence, Italy”.
- **Viers,G.et Vigneau,J.-P., 1990 :** *Eléments de climatologie Paris : Nathan(Fac Géographie).*
- **Wessels, K.J., Prince, S.D., Zambatis, N., MacFadyen, S., Frost, P.E., Van Zyl, D., 2006.** Relationship between herbaceous biomass and 1-km² Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) NDVI in Kruger National Park, South Africa. *Int. J. Remote Sens.* 27 (5), 951–973. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160500169098>.
- Wellens J, Raes D, Traoré F, Denis A, Djaby B. et Tychon B: 2014.** Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment.
- Xanthoulis D., 2010 :** *Calcul ET0-Penman.pdf.* 54 pp.
- Zella, L. 2015 :** *Irrigation eau, sol P214.215.*

Introduction générale

Première partie

Synthèse bibliographique

Deuxième partie

Matériels & Méthodes

Troisième partie

Résultats & Discussions

Conclusion générale

Références bibliographiques