

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
**Ministere de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**
جامعة سعد دحلب البليدة
Université BLIDA -1-
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Biotechnologies



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN AGRONOMIE

Option : Eau et Environnement

Présenté par :

M^{elle} Benouada Hedda

Thème :

**Réponse du modèle AquaCrop à différents calendriers
d'irrigation : Cas de la culture de pomme de terre en
climat aride**

Devant le jury :

- | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|
| • L. Zella | Pf Université Blida 1 | Président de jury |
| • M. Amirouche | MAB ENSA | Promoteur |
| • N. Mimouni | MAA Université Blida 1 | Examineur |
| • H.Dghaichia | MAA Université Blida 1 | Examineur |

2019/2020

Dédicace

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Que dieu vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

A ma belle grand-mère yamma hedda

A mes adorables sœurs maryem, chilia, raouia.

A mes chers frères soulaymen et daoud



Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu le tout Puissant de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce travail dans de bonnes conditions, également je remercie infiniment mes parents, qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de ma formation.

Toute ma gratitude à Monsieur le professeur **Zella Lakhdar** pour la qualité de l'enseignement qu'il m'a prodigué au cours de ces trois années passées et pour ces conseils éclairés.

Je remercie mon encadreur **Mr Amirouche Mawhoub** maître assistant à l'école national supérieur d'agronomie pour son encadrement, sa précieuse aide, son appui et ses conseils.

Comme je remercie également les membres du jury :

Mr. Mimouni Nour elddine maître assistant à l'Université de blida1 et

Mr. Deghaichia Houssem maître assistant à l'université de blida1 d'avoir accepté d'évaluer ce travail

Un grand merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail trouvant ici le témoignage de mon estime.



Résumé

Les modèles de simulation qui illustrent les effets de l'eau sur le rendement des cultures, sont considérés comme des outils utiles pour améliorer la gestion de l'eau et optimiser l'efficacité de son utilisation. La FAO a récemment mis au point un modèle axé sur l'eau nommé AquaCrop. Cet outil d'aide à la décision, permet la planification et l'analyse de scénarios dans différentes saisons et dans divers endroits avec une sophistication limitée. L'objectif de la présente étude est d'analyser la réponse du modèle AquaCrop à différents régime d'irrigation. Les résultats obtenus montrent que en comparant les différences de besoins d'irrigation de la pomme de terre entre le premier scénario (scénario 1 : campagne agricole 2013) et le scénario 3, 57 mm d'eau d'irrigation supplémentaires ont été nécessaires pour satisfaire la demande en eau des cultures dans le scénario 3. Soit 7,6 % plus d'eau d'irrigation était nécessaire par rapport à une année de culture typique caractérisée par des précipitations annuelles proches de la valeur moyenne des précipitations annuelles (111,17 mm). En ce qui concerne le degré de précision ainsi que la validité des résultats du modèle, un autre facteur important qui doit être pris en compte est que les simulations du modèle ont été calibrées à l'aide des données météorologiques d'une station située à l'aéroport local, donc la représentativité des résultats pour les cultures les champs situés trop loin de cet emplacement peuvent être interrogés sans un nouveau calibrage de modèle valide.

Mots clés : Oued souf, Pomme de terre, AquaCrop, modélisation, irrigation

Abstract

Response of the AquaCrop model to different irrigation schedules: the case of potato cultivation in arid climate

Simulation models that illustrate the effects of water on crop yields are considered useful tools for improving water management and optimising water use efficiency. FAO has recently developed a water-based model called AquaCrop. This decision support tool allows planning and analysis of scenarios in different seasons and locations with limited sophistication. The objective of the present study is to analyse the response of the AquaCrop model to different irrigation regimes. The results obtained show that when comparing the differences in potato irrigation requirements between the first scenario (scenario 1: 2013 crop years) and scenario 3, 57 mm of additional irrigation water was required to meet the crop water demand in scenario 3. That is, 7.6% more irrigation water was needed compared to a typical crop year with annual precipitation close to the average annual precipitation value (111.17 mm). With

regard to the degree of accuracy as well as the validity of the model results, another important factor that has to be taken into account is that the model simulations were calibrated using meteorological data from a station located at the local airport, so the representativeness of the results for crops grown in fields located too far away from this location can be questioned without a new valid model calibration.

Keywords: Ouedsouf, potato, AquaCrop, modelling, irrigation

الملخص

تعتبر نماذج المحاكاة الموجزة ، التي توضح تأثيرات المياه على غلات المحاصيل ، أدوات مفيدة لتحسين إدارة المياه وتحسين كفاءة استخدامها. طورت منظمة الأغذية والزراعة مؤخرًا نموذجًا يعتمد على الماء يسمى AquaCrop. تسمح أداة دعم القرار هذه بتخطيط وتحليل السيناريوهات في المواسم المختلفة وفي المواقع المختلفة مع محدودية التطور. الهدف من هذه الدراسة هو تحليل استجابة نموذج AquaCrop لأنظمة الري المختلفة. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أنه بمقارنة الاختلافات في احتياجات ري البطاطس بين السيناريو الأول (السيناريو 1: المحاصيل عام 2013) والسيناريو 3 ، كانت هناك حاجة إلى 57 ملم من مياه الري الإضافية لتلبية الطلب على المياه للمحاصيل في السيناريو 3. وهذا كانت هناك حاجة إلى 7.6 ٪ من مياه الري مقارنة بسنة المحاصيل النموذجية التي تتميز بهطول الأمطار السنوي بالقرب من القيمة المتوسطة للتساقط السنوي (111.17 ملم). فيما يتعلق بدرجة الدقة وكذلك صحة نتائج النموذج ، هناك أهمية أخرى العامل الذي يجب أخذه في الاعتبار هو أن نماذج المحاكاة قد تمت معايرتها باستخدام بيانات الأرصاد الجوية من محطة تقع في المطار المحلي ، لذلك يمكن الاستعلام عن تمثيل نتائج المحاصيل للحقول البعيدة جدًا عن هذا الموقع بدون نموذج جديد صالح معايرة.

كلمات مفتاحية: واد سوف ، بطاطس ، AquaCrop ، نمذجة ، ري

Liste des abréviations

ANDI: Agence National de Développement et de l'Investissement.

°C : Degré Celsius

Cm : Centimètre

DPAT: Direction de la Planification et de l'Aménagement de Territoire

DSA: Direction des Services Agricoles.

FAO: Food and Agriculture Organization.

ET : Evapotranspiration.

ETc : Evapotranspiration potentielle de culture.

ETm : Evapotranspiration maximale.

ETo : Evapotranspiration de référence.

ETP : Evapotranspiration potentielle.

Ha : Hectare.

INRA: Institut Nationale de la Recherche Agronomique.

Kg: Kilogramme .

Ks : Coefficient de stress

Ksat : La conductivité hydraulique à saturation

L : Litre

m² : Mètre carré

Max : Maximale

Min : Minimale

Mm : Millimètre

MADR: Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural .

MADRP: Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural et de la Pêche

ONM: Office National de la Météorologie.

PDT: Pomme de terre.

PNDA: Plan National de Développement Agricole.

Qx: Quintaux.

RDT : Rendement

SAU: Superficie Agricole Utile

WP : Water productivity

θ_{fc} : La capacité au champ

θ_{PWP} : Point de flétrissement permanent

θ_{sat} : La teneur en eau du sol à saturation

Liste des figures

Figure01 : Le cycle végétatif de la pomme de terre (Moëne, 2008).

Figure02: Plante de la pomme de terre Zine (2009).

Figure 03: Production de pomme de terre dans le Maghreb (Unité : tonnes) (FAO, 2014).

Figure 04 : Production de la pomme de terre en Algérie de 1961 à 2014. Source FAO, 2016).

Figure 05 : Répartition spatiale de la pomme de terre en Algérie (fait à partir les données de MADR, 2013).

Figure 06 : Etapes de la démarche de modélisation (d'après Coquillard et Hill, 1997).

Figure 07 : Organigramme schématique d'un modèle de culture théorique fonctionnant au pas de temps journalier (source : White et Hoogenboom, 2010).

Figure 08 : situation géographique d'ouad souf (photo de google).

Figure 09 : Diagramme ombrothermique de "Gausсен" de la région du Souf (2008-2017).

Figure 10 : Répartition de la population par branches d'activités.

Figure 11 : Les relations fonctionnelles entre les différents composants du modèle (Steduto et al. 2012).

Figure 12 : L'organigramme des différents modules du modèle AquaCrop (Raes et al. 2009).

Figure 13: Données d'entrée définissant l'environnement dans lequel la culture va se développer (Raes et al. 2009).

Figure 14. Variabilité interannuelle des précipitations (1997-2018).

Figure 15. Variabilité interannuelle des températures moyennes (1978/2018).

Figure 16. Variation interannuelle de l'humidité relative.

Figure 17. Variation interannuelle de l'évapotranspiration.

Figure 18. Variation interannuelle de la pluie efficace.

Figure 19. Simulation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures (culture: pomme de terre).

Figure 20. Pluviométrie mensuelle à El Oued (période: année 2013).

Figure 21. Besoin en eau d'irrigation et précipitations cumulées par rapport aux besoins en eau des cultures.

Figure 22. Évaluation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures pour une saison de culture caractérisée par une pénurie de précipitations.

Figure 23. Pluviométrie mensuelle à El Oued (période: année 2001).

Figure 24. Irrigation nette et précipitations cumulées par rapport aux besoins en eau de la pomme de terre.

Figure 25. Évaluation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures pour une saison de culture caractérisée par une température quotidienne de l'air de 2 ° C plus élevée.

Figure 26. Irrigation et précipitations nettes cumulées par rapport aux besoins en eau de la culture de pomme de terre.

Liste des tableaux

Tableau 01 : botanique de *Solanum tuberosum* (Hawkes, 1990).

Tableau 02 : Principaux pays producteurs de pomme de terre (FAO ,2014).

Tableau 03 : Productions et Superficies cultivées de pommes de terre en Algérie.

Tableau 04 : Les moments de plantation et de récolte de la pomme de terre

Tableau 05 : Données climatiques de la région d'El Oued (2008- 2017) (DSA, 2018).

Tableau 06 : Répartition de la population par branches d'activités dans la wilaya de El-Oued (DPAT, 2016).

Tableau07: répartition générale des terres de la wilaya EL-oued (DPAT, 2016)

Tableau 08 : Paramètres utilisés dans la calibration du modèle AquaCrop

Sommaire

Resumé

Introduction générale	01
Chapitre 1. La culture pomme de terre	03
1. données générales sur la culture	03
1.1. Origine, historique	03
1.2. Cycle végétatif	03
1.3. Classification et Description botanique	05
1.4. Exigences écologiques de la plante	06
1.4.1. Exigences climatiques	06
1.4.2. Exigences édaphique	07
1.4.3 Exigence en éléments minéraux	07
1.4.4. Exigences hydriques	08
1.5. La production de la pomme de terre	09
1.5.1. Production mondiale	09
1.5.2. La culture de pomme de terre dans le Maghreb	10
1.5.3. La culture de pomme de terre en Algérie	10
1.5.4. La répartition géographique de la culture de la pomme de terre en Algérie	11
Chapitre 2. Modélisation agronomique	13
1. Importance de l'outil de simulation	13
2. Classification générale des modèles	13
3. La démarche dans la modélisation	14
4. Les modèles de culture	15
4.1. Description, classification et utilisation	15
4.2. Chronologie et évolution	18
Chapitre 3. Présentation de la région d'étude	21
Introduction	21
1. Situation géographique	22
2. Les caractéristiques climatiques	23
3. Relief	26

4. Pédologie.....	27
5. Aspect hydrogéologique.....	27
6. Topographie.....	28
7. La flore et la faune.....	28
8. Milieu socio –économique.....	29
9. Potentiel agricole.....	30
Chapitre 4. Modèle AquaCrop	31
1. Description du modèle aquacrop	31
2. Les relations entre les différents composants du modèle	32
3. Les données d’entrées.....	34
- Données climatiques	35
- Caractéristiques des cultures	36
- Caractéristiques du sol.....	36
Pratiques de gestion.....	36
Calibration du modèle.....	37
Chapitre 5. Résultat et discussion	
1. Analyse les paramètres climatiques.....	39
1.1. Pluie annuelle.....	39
1.2. Température moyenne annuelle.....	39
1.3. Humidité relative.....	40
1.4. Evapotranspiration.....	40
1.5. Pluie efficace.....	41
2. Analyse des scénarios proposés.....	41
2.1. Évaluation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures pour une saison de culture caractérisée par une pénurie de précipitations (année sèche).....	41
2.2. Évaluation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures pour la campagne agricole 2009.....	43
2.3. Évaluation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures pour une saison de culture caractérisée par une augmentation de la température de l'air MAX et MIN.....	45
Conclusion.....	47
Référence bibliographié	48

Introduction générale

Introduction générale

En Algérie, la culture pomme de terre, dans tous ses volets semences et consommation, a un poids économique considérable et occupe une place stratégique dans les nouvelles politiques de renouveau agricole et rurale. Elle est en première ligne dans la lutte contre la faim et la pauvreté dans le monde. La FAO a déclaré l'année 2008 comme étant l'année internationale de la pomme de terre (FAO, 2008). Ces dernières décennies, le développement agricole dans les régions sahariennes en Algérie, a connu des évolutions rapides et subi des mutations importantes, résultat de considérables efforts entrepris par les pouvoirs publics et d'un processus naturel de croissance socioéconomique ayant constitué pendant longtemps la base principale des activités économiques culturelles et sociales. L'agriculture demeure aussi l'élément le plus important de la fixation de la population et de la préservation de l'ensemble écologique et du climat dans les régions sahariennes (DSA, 2005).

A partir des années 2000, la culture de la pomme de terre dans la région les régions sahariennes surtout la région d'oued souf a connu une expansion fulgurante qui s'est traduite par une augmentation importante des superficies cultivées et par l'amélioration des rendements. Aujourd'hui, cette culture est fortement intégrée dans les systèmes de production agricole en raison de la rentabilité de cette culture, la demande accrue de cette matière alimentaire, l'accroissement de la population et l'évolution des habitudes alimentaires.

Malgré, la réussite de la culture de la pomme de terre dans les régions saharienne , qui est due surtout à sa meilleure adaptation aux régions agricoles d'une part, et à la place importante qu'elle occupe dans le régime alimentaire de la population d'autre part, cette culture demeure fragilisée à cause de certaines contraintes qui influencent négativement la production et le rendement, et le manque d'eau c'est le contrainte le plus important qui influence directement sur la culture de pomme de terre dans les régions aride comme Oued sauf.

L'utilisation d'outils de simulation pourra améliorer la compréhension du comportement variétal en condition de contraintes hydriques et aider à déterminer les phases de stress avec exact étude et leur impact sur le potentiel de production (Steduto et al. 2009).

Ils permettent d'estimer les besoins en eau de la culture et donc de mieux gérer les ressources hydriques. La prévision du rendement final permet aux agriculteurs de réorienter la conduite des cultures. Les modèles permettent également aux décideurs d'avoir une idée préalable sur le manque ou l'excès d'un produit agricole lorsque des études régionales sont réalisées (Andarzian et al. 2011).

Introduction générale

La FAO a mis au point un modèle de culture concernant la réponse du rendement à l'eau nommé « AquaCrop ». Ce modèle de simulation de la productivité des cultures par rapport à l'eau résulte de la révision du document d'irrigation et de drainage n ° 33 de la FAO, intitulé «Réponse du rendement à l'eau» (Doorenbos et Kassam, 1979).

AquaCrop est utilisé comme un outil d'aide à la décision dans la planification et l'analyse de scénarios dans différentes saisons et lieux (Steduto et al. 2009, Hsiao et al. 2009).

Ce modèle, simule davantage, la réponse du rendement des cultures à l'eau, particulièrement là où elle est facteur clé limitant la production agricole.

Ce document est structuré en trois parties :

- La première partie abordera dans un premier temps les caractéristiques de la culture en question (son origine, sa classification botanique, leurs places à l'échelle mondiale et nationale). Dans un second chapitre le pilotage d'irrigation et enfin le dernier chapitre abordera les modèles de cultures (AquaCrop) qui ont été choisis comme des outils principaux à la modélisation.

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

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

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

Partie1

synthèse bibliographie

Chapitre 1. La culture pomme de terre

1. données générales sur la culture

1.1. Origine, historique

La pomme de terre 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 (Lahouel, 2015). En 1573, elle est attestée en Espagne. Peu de temps après, les tubercules voyagent à travers l'Europe sous forme de présents exotiques (Poitrineau, 2001). 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. La production est très importante dans certains pays dont l'Egypte; le Malawi; l'Afrique du Sud; l'Algérie; Nigéria ... (Lahouel, 2015).

1.2. Cycle végétatif

Le cycle de la pomme de terre comprend trois étapes et se fait par le tubercule qui sert à la multiplication végétative et se déroule en trois étapes : la dormance, la germination et la tubérisation.

1.2.1. Dormance

Après la récolte, la plupart des variétés de pommes de terre traversent une période de dormance où le tubercule ne germe pas, quelle que soient les conditions climatiques (température, éclairage et humidité,...), et sa durée dépend beaucoup de la variété et des conditions d'entreposage, et surtout de la température. Pour accélérer la germination, on peut traiter les tubercules de semence par des produits chimiques ou les exposer alternativement à des températures élevées et basses (Lahouel, 2015).

1.2.2. Germination

Le tubercule est placé dans des conditions favorables (16-20°C, 60-80% d'humidité relative) instantanément après la fin de son repos végétatif, il commence à germer, les tubercules deviennent capables d'émettre des bourgeons après une évolution physiologique interne, ce qui conduit à un seul germe qui se développe lentement et issu du bourgeon terminal qui inhibe les autres bourgeons, c'est la dominance apicale, puis un petit nombre de germes à croissance rapide se développent. Ensuite, un nombre de plus en plus élevé de germes

démarrent, traduisant la perte de la dominance apicale. Ils s'allongent lentement, se ramifient, deviennent filiformes et finalement tubérisés (Kechid, 2005).

1.2.3. Tubérisation

La tubérisation commence par un arrêt d'élongation des stolons après une période de croissance. Ce phénomène se réalise dès que le diamètre des ébauches est le double de celui des stolons qui les portent. Le grossissement des ébauches de tubercules s'effectue par accumulation dans les tissus des substances de réserve synthétisées par le feuillage. Ce grossissement ralentit puis s'arrête au cours de l'affaiblissement du feuillage (Chabbah, 2016).

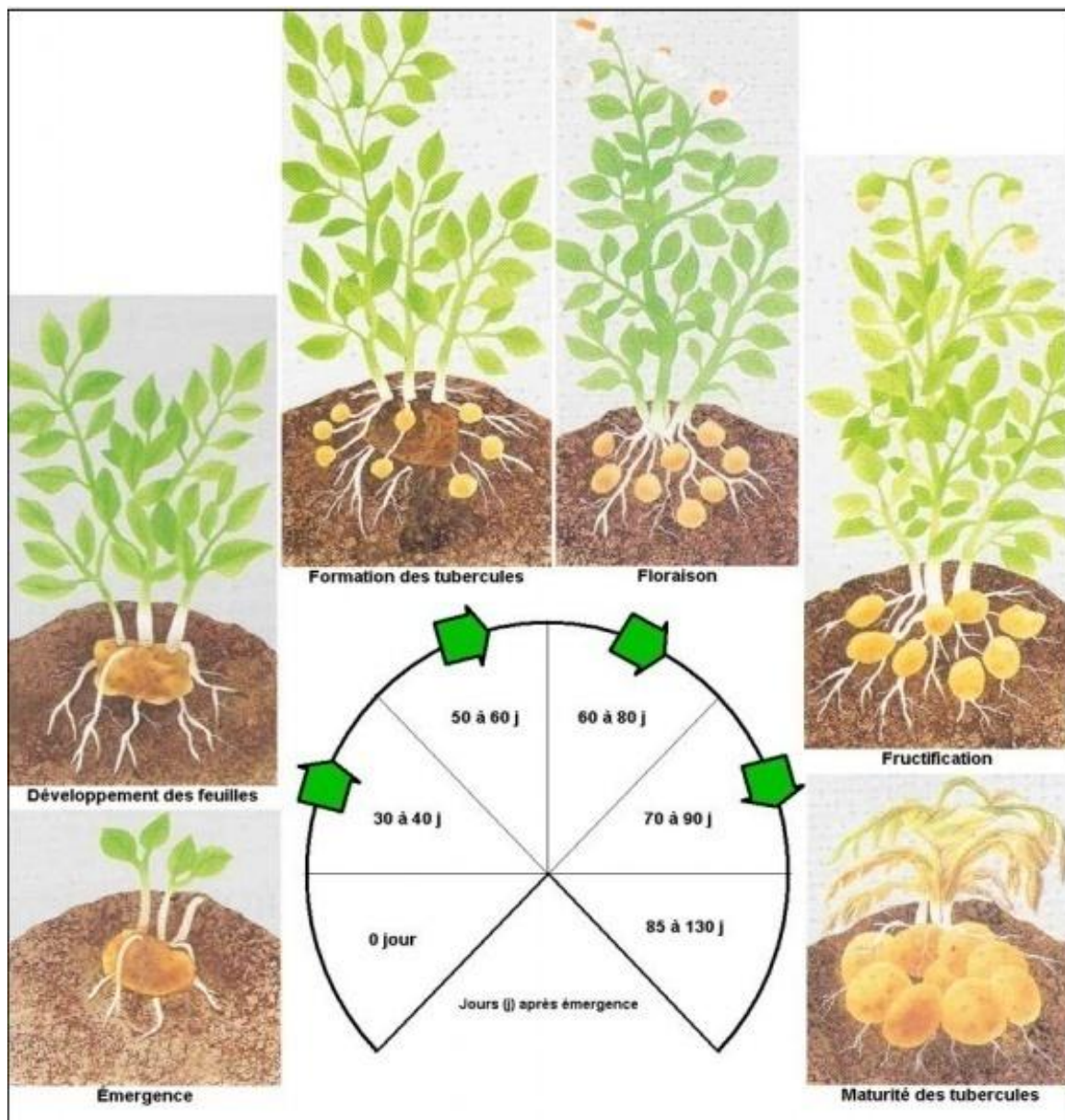


Figure 01 : Le cycle végétatif de la pomme de terre (Moëgne, 2008)

1.3. Classification et Description botanique

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*L.) appartient à la famille de solanacées. Le genre *solanum* regroupe environ 2000 espèces dont plus de 200 sont tubéreuses dont les tubercules font l'objet d'un commerce international important (Boufares, 2012). Selon Rousselle *et al* (1992), le *Solanum tuberosum* est une plante vivace qui se propage par multiplication végétative et qui est cultivée comme une espèce annuelle.

1.3.1. Classification

Tableau 01. Classification botanique de *Solanum tuberosum* (Hawkes, 1990).

Règne	Métaphytes (végétaux supérieurs)
Embranchement	Spermatophytes
Classe	Dicotylédones
Sous-classe	Asteridae
Ordre	Polemoniales
Famille	<i>Solanaceae</i>
Genre	<i>Solanum L</i>
Espèce	<i>Solanum tuberosum</i>

Cette plante à tubercules a subi une évolution que rarement des végétaux connaissent (amélioration et séquençage génétique par le biais de la biotechnologie). Les chiffres de sa consommation directe et de ses différentes transformations dans l'industrie lui prédisent un avenir des plus prometteurs (TRIA ,2009).

1.3.2. Morphologie de la plante

a. Le système aérien

Le système aérien est annuel Les tiges aériennes, au nombre de 2 à 10, parfois plus, et ont un port plus au moins 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).

b. Le système souterrain

Le système souterrain porte des tubercules vivaces. Les racines, nombreuses et fines, fasciculées et peuvent pénétrer profondément le sol, s'ils sont suffisamment meubles, Les tiges souterraines ou rhizomes, ou stolons, sont courtes et leurs extrémités se renflent en tubercules. Ces tubercules sont les organes de conservation qui permettent de classer la pomme de terre parmi les plantes vivaces à multiplication végétative (Soltner, 1979).

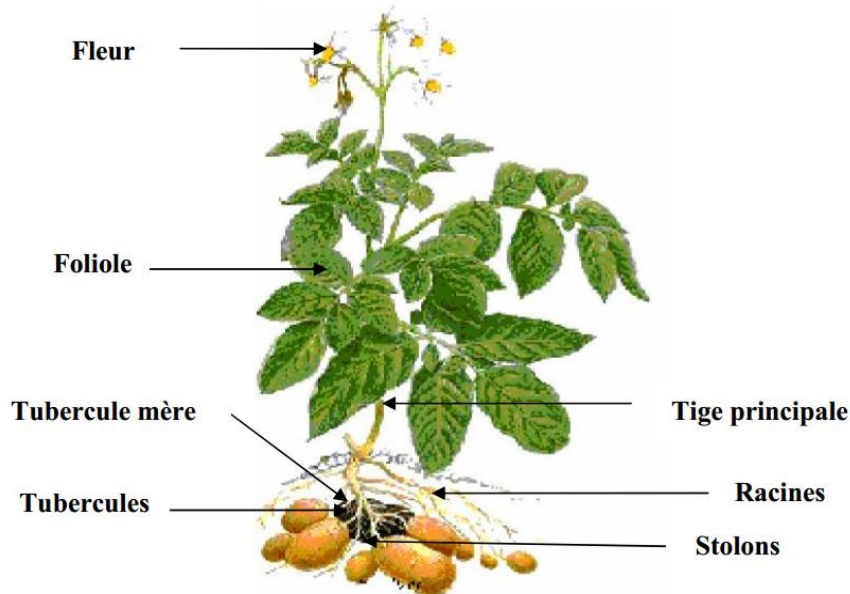


Figure 02 : Plante de la pomme de terre Zine (2009)

1.4. Exigences écologiques de la plante de pomme de terre

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

1.4.1. Exigences climatiques

1.4.1.1 La température

Elle influence beaucoup le type de croissance. Les hautes températures stimulent la croissance des tiges; par contre, les basses températures favorisent davantage la croissance du tubercule (Rousselle et al. 1996). La pomme de terre est très sensible au gel. Le zéro de végétation est compris entre 6 et 8°C. Les températures optimales de croissance des tubercules se situent aux alentours de 18°C le jour et 14-12°C la nuit. Une température du sol supérieure à 25°C est défavorable à la tubérisation. Les sommes des températures correspondant aux groupes extrêmes de précocité sont de l'ordre de : 1600°C pour les variétés primeurs (90 jours). 3000 °C pour les variétés tardives (200 jours). Le tubercule gèle entre

1°C et 2.2°C. La température de stockage de la récolte devra être inférieure à 6°C (Moule, 1972).

1.4.1.2. 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).

1.4.1.3. 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 notre qu'une carence ou un déficit en humidité pourrait avoir des conséquences très graves vis-à-vis du rendement surtout aux stades croissance et tubérisation. (Anonyme, 1985).

4.2. Exigences édaphiques

1.4.2.1. 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-argileuse, au sous-sol profond.

1.4.2.2. 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.

1.4.2.3. Salinité

La pomme de terre est relativement tolérante à la salinité par rapport aux autres cultures maraîchères. Cependant, un taux de salinité élevé peut bloquer l'absorption de l'eau par le système racinaire. Lorsque la teneur en sel est élevée, le point de flétrissement est atteint rapidement.

On peut réduire la salinité d'un sol en le lessivant avec une eau d'irrigation douce.

1.4.3. Exigence en éléments minéraux

La pomme de terre est très exigeante en éléments minéraux surtout en azote, phosphore, potasse, Magnésium, et Calcium. Elle est très sensible à l'apport raisonné des engrais, car sa végétation est très intense et en générale courte de 90 à 200 jours au maximum selon les variétés (Darpoux, 1967).

D'après Herert et Crosnier (1975), les besoins en éléments nutritifs du point de vue organique minéral, sont élevés et sensiblement proportionnels aux rendements notamment pour le potassium, le phosphore et l'azote. Les exportations en éléments minéraux sont élevées, et

sont dominées par le potassium, puis l'azote et le phosphore. Selon les rendements, elles seront d'après Darpoux (1967) de l'ordre de :

Élément minéraux	Potasse	azote	Acide phosphorique	magnésie	Chaux	Soufre
Quantité kg/tonne de tubercules	6 a 10	3.2 à 5	1.6 à 2	0.4 a 0.8	2.01 a 4.3	0.3

La pomme de terre, en sol bien pourvus en potasse peut absorber des quantités considérables de potassium réalise ainsi une consommation de luxe vis-à-vis de cet élément qui se traduisant par des exportations très élevées pouvant atteindre les 300 kg/ha. (Darpoux, 1967).

Les exigences de la pomme de terre en éléments minéraux dépendent des facteurs suivants :

- le rendement en tubercules ;
- le type de culture ;
- le potentiel nutritif du sol ;
- les données pédoclimatiques

1.4.4. Exigences hydriques

Les exigences de la culture de pomme de terre sont très élevées. Elles sont de l'ordre de 250 à 300 kg d'eau par kilogramme de matière sèche. Par ailleurs, ses besoins sont constants pendant toute la durée de végétation. En période de forte tubérisation c'est jusqu'à 80 m³ d'eau par hectare et par jour qui peut lui être nécessaires. La durée de végétation étant courte et souvent même très courte (variétés hâtives) il faudra donc veiller à lui préparer une alimentation en eau abondante et régulière par, en particulier, une bonne préparation du sol. Une sécheresse intense, ou survenant brutalement, peut arrêter la végétation. Lorsque celle-ci repart il y a «repousse» ; les tubercules déjà formés émettent des germes au bout desquels peuvent se former de petite tubercules, plus riches en azote et pauvres en sucres, difficiles à conserver ; on dit encore que les premiers tubercules «mère» : ils sont en partie vides de leur substance et deviennent plus ou moins inconsommables (Moule, 1972). L'irrigation peut donc avoir un sérieux intérêt. Mais elle doit bien être conduite. Un excès d'eau peut être néfaste en diminuant la richesse en fécule et en favorisant le développement du mildiou et de la pourriture (Moule, 1972).

1.5. La production de la pomme de terre

1.5.1. Production mondiale

Quatrième production vivrière mondiale (après le riz, le blé, le maïs) mais première production non céréalière, la pomme de terre s'adapte à des situations très diverses: du cercle polaire à l'équateur en jouant sur les saisons, les variétés, l'altitude... etc. Elle joue un rôle clé dans le système alimentaire mondial. C'est la principale denrée alimentaire non céréalière du monde. Parmi 153 pays producteurs de pomme de terre, la production mondiale a atteint le chiffre record de 385,074 millions de tonnes(Mt) en 2014 (FAO, 2018). Dans les pays développés, la consommation de pommes de terre augmente considérablement et représente plus de la moitié de la récolte mondiale. Comme elle est facile à cultiver et que sa teneur énergétique est élevée, c'est une culture commerciale précieuse pour des millions d'agriculteurs (TRIA, 2011). Certain l'appelle l'aliment du futur, selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) au cours des vingt prochaines années, la population mondiale devrait croître de plus de 100 millions d'habitants par an, dont plus de 95% dans les pays en développement, où la pression sur la terre et l'eau est déjà très forte. Le défi principal que doit relever la communauté internationale consiste, par conséquent, à garantir la sécurité alimentaire des générations présentes et futures, tout en protégeant la base des ressources naturelles dont nous dépendons (Boufares, 2012). La pomme de terre sera un élément important des efforts déployés pour relever ces défis. Les grands pays producteurs sont la Chine, l'Inde et la Fédération de Russie. L'Algérie occupe la quinzième classe mondiale (FAO, 2018).

Tableau 02 : Principaux pays producteurs de pomme de terre (FAO ,2014).

Classement	Pays	Production (tonnes)
1	Chine	96 136 320
2	Inde	46 395 000
3	Russie	31 501 354
4	Ukraine	23 693 350
5	Etats-Unis	20 056 500
6	Allemagne	11 607 300
7	Bangladesh	94 351 50
8	France	80 54 500

1.5.2. La culture de pomme de terre dans le Maghreb

Avec 6,66 millions de tonnes produites en Maghreb lors de la campagne 2012/2013, l'Algérie est le premier producteur magrébin en volume de pomme de terre avec une production de 4,4 millions de tonnes, suivie par le Maroc avec une production de 1,9 millions de tonnes et la Tunisie en dernière position avec une production de 0,34 millions de tonnes Figure03

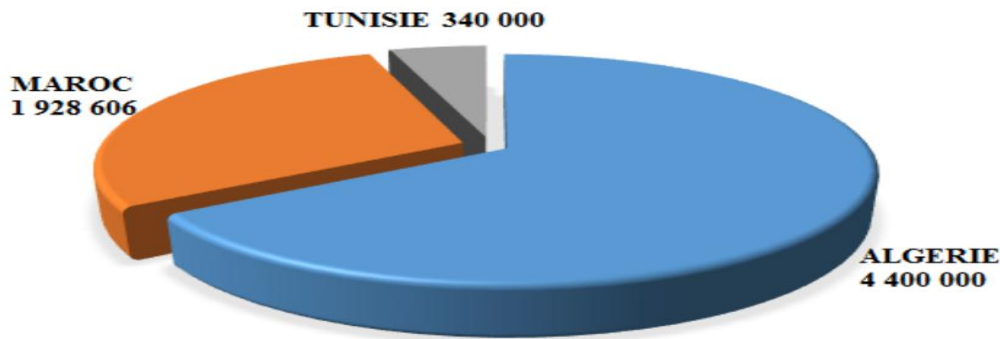


Figure 03 : Production de pomme de terre dans le Maghreb (Unité : tonnes) (FAO, 2014)

1.5.3. La culture de pomme de terre en Algérie

En Algérie, la pomme de terre est le légume le plus consommé, en plus il est présent quotidiennement dans les repas Algériens et sous différentes formes. Après le blé, la culture de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) fut introduite en Algérie au milieu XVI^{ème} siècle, Depuis, la pomme de terre est devenue une des principales cultures destinées à la consommation domestique et en 2006, la production a atteint le chiffre record de 2,18 millions de tonnes. La superficie cultivée est de 100 000 ha, et la pomme de terre peut être plantée et récoltée dans n'importe quelle région, en fonction des saisons. La pomme de terre est surtout cultivée sur la côte méditerranéenne, qui jouit d'un climat tempéré propice à sa culture tout au long de l'année (Lahouel, 2015). En Algérie, la production en 2014/2015 toute catégorie de pommes de terre confondues se situe autour de 4.5 millions de tonnes dont 0,45 millions de tonnes de semences pour une superficie de l'ordre de 153.313 hectares avec une moyenne de 2.96 tonnes/hectare au niveau de l'Algérie (DSA, 2015).

Tableau 03. Productions et Superficies cultivées de pommes de terre en Algérie.

Années	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Productions (tonnes)	2180961	1506859	1506859	2636057	3300312	3862194	4219476	4219476	4673516
Superficies Cultivées/ha	4673516	4673516	91841	105121	121996	131903	138666	140000	153313

(MADR, 2015)

Algérie - Pomme De Terre - Production (Tonnes)



Source : FAO
Années : 2016
Création : Actualitix.com - Tous droits réservés



Figure 04 : Production de la pomme de terre en Algérie de 1961 à 2014. Source FAO, 2016).

1.5.4. La répartition géographique de la culture de la pomme de terre en Algérie

La Pomme de terre peut être cultivée dans n'importe quelle région du territoire national y compris dans les oasis du sud du pays (MADR, 2013) et à n'importe quel mois de l'année 111 pourvu qu'il n'y ait pas de gel et de sécheresse (Omari, 2011). Elle est fortement influencée par les conditions agro climatiques et par les possibilités d'irrigation. Elle est répartie comme suit :

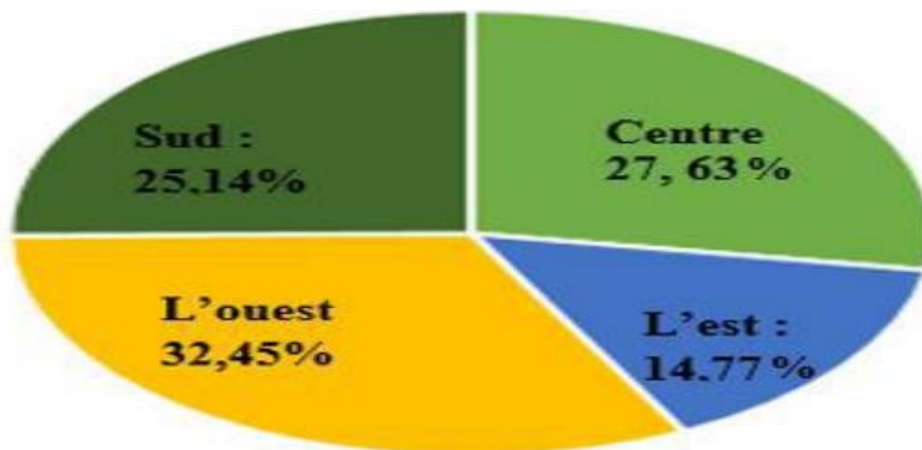


Figure 05 : Répartition spatiale de la pomme de terre en Algérie (fait à partir des données de MADR, 2013).

L'Ouest : celui constitué par les wilayates de Tlemçen, Mostaganem, Mascara, Tiaret et Chlef qui présentent une superficie de plus de 45 000 ha avec une moyenne de 32,45% de la superficies totale réservée à la pomme de terre (MADR, 2013). **Au centre**, constitué par les wilayate d'Ain defla, Tipaza, Alger, Boumerdes et Tizi ouzou

avec une superficie de 38 314 ha en moyenne de 27,63% de la superficie totale réservée à la pomme de terre (MADR, 2013).

A l'Est, le petit bassin constitué par la wilaya de Skikda sur le littoral et celle de Guelma, Batna, Sétif et Tébessa (près de 20 488 ha par an soit près de 14,77% des surfaces) (MADR, 2013).

Au Sud, principalement au bassin d'El Oued, où la pomme de terre est devenue en quelques années, une spéculation majeure avec près de 34 864 ha soit près de 25,14% (MADR, 2013).

1.5.5. Dates de plantation de la pomme de terre

Contrairement aux pays septentrionaux où la pomme de terre est cultivée durant une saison, en Algérie la pomme de terre est cultivée selon trois calendriers de culture. Le tableau suivant retrace les moments de plantation et de récolte de la pomme de terre.

Tableau 04 : Les moments de plantation et de récolte de la pomme de terre

Les mois	J	F	M	A	M	J	JU T	A	S	O	N	D
Les calendriers												
PDT d'arrière-saison	R	R				P	P	P			R	R
PDT d'arrière-saison	R	R	R							P	P	P
PDT d'arrière-saison	P	P	P	P	R	R	R	R	R			P

(PDT : pomme de terre, **P**: Plantation, **R**: Récolte).

Selon le tableau 02, la plantation de la pomme de terre.

- Arrière-saison est du mois de juin au mois d'août.
- Primeur est du mois d'octobre jusqu'à le mois de décembre.
- Saison est du mois de décembre au mois d'avril.

Chapitre 2. Modélisation agronomique

1. Importance de l'outil e simulation

Simuler veut dire imiter et reproduire, et la simulation existait depuis l'Antiquité. L'homme, pour survivre, a en effet dû inconsciemment utiliser la simulation de processus futurs. Un modèle est une simple description d'un système, aussi bien qu'une abstraction de la réalité (Swain et al. 2006, 2007). Un modèle peut se définir aussi comme une représentation simplifiée et idéalisée de la réalité, construite sur la base d'un ensemble ordonné d'hypothèses relatives à un phénomène observable et mesurable, et ayant pour but de reproduire au mieux le comportement du système réel étudié, en fonction de la problématique posée et des objectifs du modélisateur (Coquillard et Hill, 1997). L'utilisation de modèles offre plusieurs avantages vis-à-vis de l'expérimentation en conditions réelles. Par exemple, dans une simulation, il est facile de modifier les variables exogènes et le paramétrage du modèle et ainsi contrôler l'environnement de simulation. En outre, les modèles permettent de simuler des écosystèmes complexes mettant en jeu de nombreuses interactions entre les composantes constitutives du système et avec les facteurs biotiques ou abiotiques du milieu (Thornley, 2001). Aussi, la simulation peut souvent fournir une information que l'expérimentation seule n'aurait pas pu offrir, parce que contrainte par le temps et les ressources nécessaires (Soussana et al. 2010).

2. Classification générale des modèles

Selon les types de classification, les modèles peuvent être: conceptuels, physiques ou mathématiques (Acock et Acock, 1991). Ils peuvent aussi être déterministes ou stochastiques, dynamiques ou statiques, mécanistes ou empiriques (Graux, 2011). Un modèle déterministe est un modèle dont les prédictions ne reposent pas sur des distributions de probabilité, contrairement aux modèles stochastiques dont les prédictions intègrent de fait un caractère aléatoire. Un modèle dynamique utilise généralement un ensemble d'équations différentielles fonctions du temps, alors qu'un modèle statique est par définition indépendant du temps (Thornley, 2001). Un modèle empirique est construit sur la base d'équations statistiques ou mathématiques qui n'ont pas pour but d'être explicatives des processus modélisés mais juste d'être prédictives. Ces équations sont établies sur la base de régressions à partir de données expérimentales (Hammer et al. 2002). Quant au modèle mécaniste, celui-ci est basé sur une certaine idée de comment le système fonctionne, sur les éléments à considérer comme importants dans la modélisation et sur les interactions qui lient ces derniers (Krishnan et al.

2009). En général, les modèles mécanistes (explanatory ou process-based models) décrivent et quantifient les mécanismes et les processus en se basant sur la formalisation d'hypothèses concernant le fonctionnement physiologique et physique du système étudié; tandis que les modèles empiriques (descriptive, predictive models) décrivent l'évolution du système au travers de relations simplifiées entre les différentes variables sans fournir d'explications sur le fonctionnement biologique ou physique. Les équations décrivant les relations sont le plus souvent obtenues à partir d'ajustements statistiques entre les différentes variables d'état mesurées (Passioura, 1996 ; Hammer et al. 2002 ; Jeuffroy et al. 2008). Afin d'étudier les interactions et interdépendances entre les éléments du système, les modèles de simulation systémiques sont dynamiques, le plus souvent déterministes et mécanistes (Graux, 2011). Ils sont organisés sur la base de sous-modèles et consistent en un ensemble (parfois considérable) de variables d'état, d'équations et de paramètres. Ces modèles sont à même de considérer beaucoup de facteurs en lien avec le système étudié et permettent de dégager le comportement d'ensemble du système en réponse à ces facteurs.

3. La Démarche dans la modélisation

La figure 05 résume les principales étapes de la modélisation. L'élaboration d'un modèle dépend étroitement des objectifs du modélisateur (et de la problématique de l'étude) ainsi que de sa connaissance du système étudié et des données expérimentales dont il dispose. L'ensemble de ces contraintes permet de définir les échelles spatiale et temporelle du modèle, le niveau de détail (les processus à modéliser) et la méthode de modélisation à employer (Coquillard et Hill, 1997). L'utilité de l'introduction d'une complexité additionnelle dans les modèles n'est pas évidente (Hakanson, 1995), la vraie vertu du modélisateur résidant dans sa capacité à représenter le système étudié avec parcimonie. Très souvent, l'échelle d'étude choisie (spatiale et temporelle) oriente les concepteurs de modèles vers une approche essentiellement descriptive (modèles empiriques) ou bien au contraire principalement explicative (modèles mécanistes) des processus identifiés comme important à modéliser pour l'échelle d'étude considérée (Bolte et al. 2006). Une fois le modèle conçu, il convient d'évaluer ou « critiquer » ses sorties. Cette étape est essentielle à la démarche de modélisation et repose sur la comparaison des valeurs simulées aux données expérimentales. La validation d'un modèle vise à quantifier les situations (e.g. pédoclimatiques) où les prédictions de ce modèle sont « valides », c'est-à-dire proches des observations mesurées en conditions réelles. Cela permet de définir le domaine de validité du modèle ainsi que sa robustesse (Thornley,

2001). Une fois le modèle évalué voire validé, les valeurs simulées peuvent servir à appréhender le fonctionnement des systèmes étudiés et à répondre à la problématique posée.

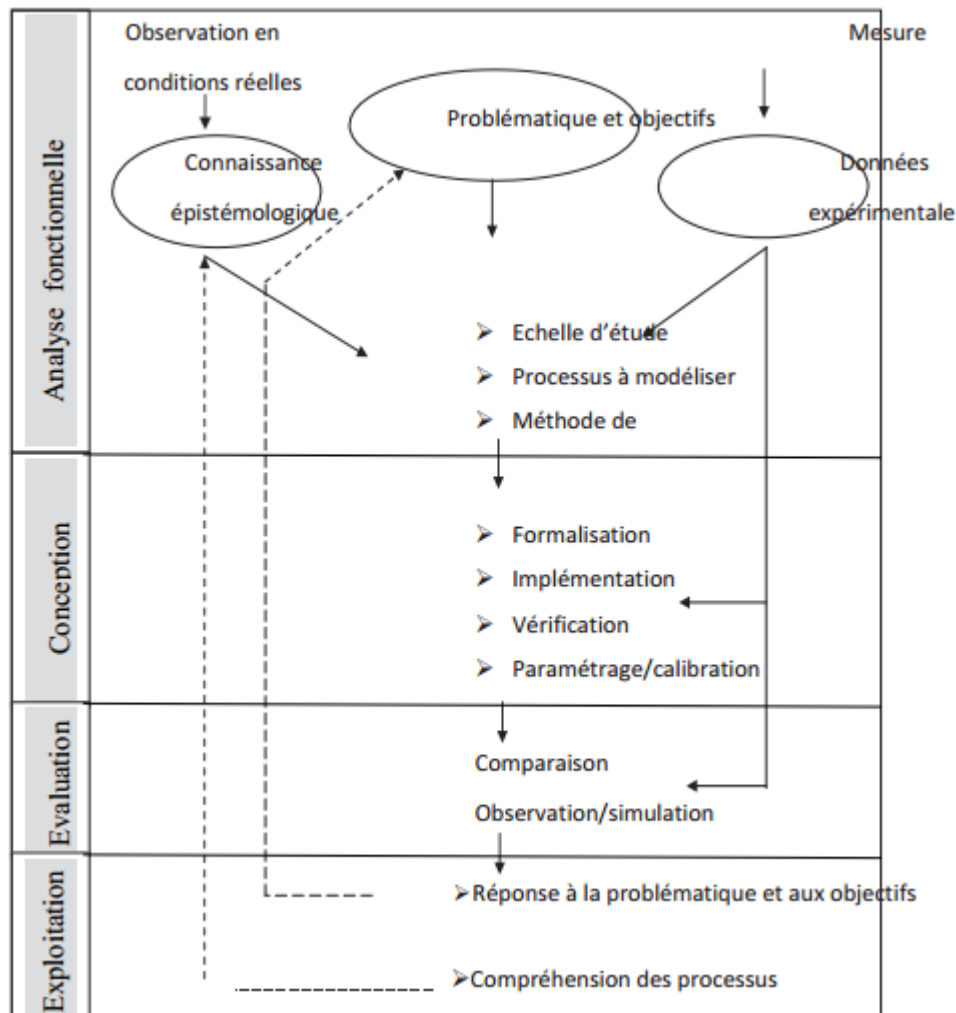


Figure 06 : Etapes de la démarche de modélisation (d'après Coquillard et Hill, 1997).

4. Les modèles de culture

4.1. Description, classification et utilisation

Les modèles de culture sont une représentation simplifiée d'un système, issue d'un certain point de vue et orientée par une certaine finalité (Jeuffroy et al.2008). Ils sont constitués d'un ensemble de relations mathématiques décrivant le fonctionnement du système sol-plante en interaction avec le climat et les opérations techniques. Pour ces raisons, les modèles de culture sont aussi appelés modèles biophysiques ou encore modèles biotechniques. Les équations mathématiques, appelées formalismes, sont constituées de variables d'état, qui caractérisent l'état du système à différents pas de temps, et de paramètres, qui définissent l'intensité des relations entre les variables d'état du système (Jones et Luyten, 1998 ; Wallach, 2006). Les

modèles de cultures, appelés aussi « modèles écophysologiques », sont des outils qui utilisent des descriptions mathématiques des processus physiologiques, chimiques et physiques, en regroupant le maximum de connaissances disponibles sur la plante (physiologie, environnement, conduite de la culture) dans l'objectif de prédire la croissance, le développement et le rendement de la plante dans le temps et dans des conditions environnementales spécifiques (White et Hoogenboom, 2010). Wolf, (1993); Rosenzweig and Parry, (1994); Downing et al. (1999) rapportent l'utilité de la simulation dans la prédiction du comportement complexe des cultures. La réponse des cultures aux variations hydriques sont de plus en plus utilisés dans l'évaluation de l'impact possible des changements climatiques sur la sécurité alimentaire. L'intérêt de ces modèles est lié à leurs possibilités de représenter quantitativement, l'action combinée et dynamique des différents facteurs environnementaux sur le fonctionnement d'ensemble de la culture. Les modèles de culture, représentent selon la démarche analytique le fonctionnement du système sol-plante-milieu dans son cadre physique et technique. Ils visent à estimer des grandeurs agronomiques telles que le rendement, la date de récolte, la consommation en eau, en azote, ou l'impact environnemental des techniques culturales sur le système (les rotations). Ces grandeurs agronomiques sont estimées à partir des calculs de flux de matière ou d'informations entre les différents compartiments du système. La complexité des relations existantes dans ce système ne peut être prise en compte dans son ensemble. Les modèles de culture reposent donc sur une hiérarchisation des processus 33 visées et des conditions de leur utilisation. Ils sont donc une représentation simplifiée du système en interaction avec les pratiques agricoles. Les modèles de culture sont physiologiquement basés sur le principe de relations causales entre les différentes fonctions de la plante et son environnement, mais en réalité ils ne peuvent pas prendre en compte toutes les interactions entre l'environnement et le système modélisé et par conséquent, peuvent inclure des hypothèses, en particulier lorsque l'information concernant certains aspects du système est insuffisante, incomplète ou inexistante (Hoogenboom, 2000). Selon la discipline scientifique, il existe différents types de modèles, allant de modèles très simples basés sur une seule équation à des modèles extrêmement avancés qui comprennent des milliers d'équations. Ainsi, les modèles de culture peuvent être classés comme suit :

a. Les modèles de croissance

Ils comprennent des représentations mathématiques simplifiées de mécanismes physiques, chimiques et physiologiques complexes en relation avec la croissance de la plante. Ils sont principalement utilisés dans des applications de la recherche, mais ne sont pas très pratiques

pour les applications agricoles, vu leur complexité et la nécessité de nombreux paramètres d'entrée (Richie, 1998).

b. Les modèles agro-météorologiques

Ce sont des modèles qui fournissent une information journalière sur le déroulement de la réponse de la plante à une sélection de variables météorologiques en fonction du temps (Baier, 1979). Les modèles agro-météorologiques comptent parmi les approches simples en matière de simulation des cultures, basées sur l'utilisation des variables agro-météorologiques comme entrée clé (Hoogenboom, 2000). Leur succès dépend fortement de leur habilité à quantifier l'influence du climat, du sol et des conditions de culture dans la simulation du développement, de la croissance et du rendement de la culture (Hansen et Jones, 2000). Ils sont utilisés opérationnellement dans de nombreuses régions du monde pour le suivi de l'effet des conditions climatiques sur la croissance des cultures et pour la prévision des rendements à une échelle régionale et continentale (Challinor et al. 2004; Hansen et al. 2004; Nemecek et al. 1996; Thornton et al. 1997; Vossen et Rijks, 1995; Yun, 2003).

c. Les modèles statistiques

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

d. Les modèles empiriques

Ces modèles comprennent des équations ou des relations empiriques pour représenter les différents processus complexes de la plante et leurs interactions avec l'environnement (Baier, 1979; Ritchie, 1998). Parmi les utilisations majeures des modèles de culture figurent l'amélioration de l'information concernant la croissance des plantes dans des conditions environnementales données, et la prévision de l'impact du changement climatique futur sur cette croissance. En effet ces modèles sont l'outil dominant dans les études d'impact du changement climatique sur les agrosystèmes (Gitay et al. 2001; Easterling et al. 2007). Comme les modèles de cultures sont constituées d'un ensemble d'équations mathématiques formalisant les hypothèses sur le fonctionnement du système sol-plante et regroupées par processus, ils peuvent être considérés comme mécanistes. Cependant, ils peuvent intégrer des relations de type empirique entre les variables caractérisant les différents processus et peuvent être considérés empiriques (Brisson et al. 2006).

e. Modèles génériques et modèles spécifiques

Une classification des modèles de culture existe en fonction du nombre de cultures prises en charge et des choix de formalismes opérés lors de l'élaboration du modèle de culture. Les modèles de culture spécifiques sont distingués des modèles de cultures génériques. Les modèles spécifiques ont été développés en effet, pour la représentation de la croissance et du développement d'une culture donnée, généralement dans l'objectif de répondre à une question précise. Ils intègrent des processus spécifiques à l'espèce concernée et prennent en compte différents facteurs de production en fonction des objectifs d'application. Pour le blé tendre, de nombreux modèles ont été développés dans ce sens. Le modèle ARCWHEAT (Weir et al. 1984) a été développé pour fournir un outil d'identification des facteurs limitant la production de blé tendre au Royaume Unis. Il a ensuite évolué pour intégrer un module de bilan hydrique et azoté (Porter, 1984 in Porter et al. 1993). Le modèle SWHEAT a été développé pour simuler la croissance et le développement du blé tendre de printemps en conditions semi-arides (Van Keulen and Seligman, 1987 in Porter et al. 1993).

Le modèle SiriusQuality1 (Martre et al. 2006), dérivé de SIRIUS (Jamieson et al. 1998) est &spécialisé dans la simulation des différentes fractions protéiques du blé tendre. Le modèle AZODYN (Jeuffroy et Recous, 1999 ; Barbotin, 2005 ; David et Jeuffroy, 2009) a été orienté pour évaluer différentes options de fertilisation sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre. Une version AZODYN-ORG a été spécifiquement développée pour l'agriculture biologique (David et al. 2005). Les modèles génériques se caractérisent par la description quantitative des processus biologiques qui sont communs à plusieurs cultures. Ils traitent la spécificité de chaque espèce au travers d'options de simulation et de différentes valeurs des paramètres (Wang et Engel, 2002). Le développement de tels modèles permet de mutualiser les connaissances acquises sur le fonctionnement des espèces et fournissent un cadre d'évaluation pour l'identification des convergences et des différences entre cultures (Brisson et al. 2006). D'un point de vue applicatif, ils permettent de simuler des successions de cultures et sont dès lors en mesure d'évaluer les performances des systèmes de culture et non pas uniquement les performances d'un itinéraire technique. Les modèles APSIM (Keating et al. 2003), CROPSYST (Stockle et al. 2003), APES (van Ittersum et al. 2008) et STICS (Brisson et al. 2003 ; Brisson et al. 2008) ont ainsi été développés dans ces objectifs. Qu'il s'agisse des modèles spécifiques ou génériques, les différences variétales sont prises en compte au travers de paramètres génotypiques ou encore variétaux (Mavromatis et al. 2001). Le couplage des modèles de décision aux modèles dynamiques de fonctionnement d'une

culture a donné naissance aux modèles biodécisionnels. Ces modèles intègrent ainsi la dynamique de prise de décision de l'agriculteur en réponse à l'évolution du système solplante. De tels modèles ont été développés pour l'irrigation du maïs, MODERATO (Bergez et al. 2001), l'irrigation et la fauche des prairies (Merot et Bergez, 2010), le pâturage des prairies (Cros et al. 2001), ou la gestion des interventions techniques du blé (Chatelin et al. 2005)

4.2.Chronologie et évolution

Depuis les premiers essais de modélisation de Wit, (1965) ; en Bonhomme, (1997), les modèles de culture se sont largement répandus touchant une grande partie des cultures et offrant un outil de réflexion sur les relations entre les cultures et leurs environnements. Les premiers modèles de cultures simulaient simplement l'évolution de la photosynthèse et du bilan de carbone en fonction du temps (Hoogenboom, 2000). Ils ont été utilisés comme base de recherche pour tester des hypothèses de base sur la croissance des plantes (Loomis et Rabbinge, 1979). D'autres processus, tels que le développement végétatif et reproductif et le bilan hydrique, ont été rajoutés par la suite (Duncan et al. 1967; Curry, 1971; Curry et Chen, 1971; Splinter, 1974). Avec le développement de l'informatique et l'amélioration de la compréhension des processus physiques de base, de nouveaux facteurs ont été considérés, tels que la dynamique de certains nutriments dans le sol et dans la plante ainsi que l'effet des maladies et ravageurs (White and Hoogenboom, 2010). L' « Ecole de Wit » (De Wit et Goudriaan, 1974; Bouman et al. 1996), définit quatre niveaux concernant l'évolution des modèles de culture.

En phase 1, la température et le rayonnement solaire sont utilisés comme entrées pour simuler la croissance et le développement et pour calculer la production potentielle. La croissance dans ce cas ne comprend que la simulation du bilan de carbone.

En phase 2, les précipitations et irrigations sont rajoutées comme entrées, et le système parvient ainsi à simuler le bilan hydrique du sol. En phase 3, la teneur du sol en azote est rajoutée comme entrée pour simuler la croissance et le développement, le bilan hydrique ainsi que le bilan d'azote. En phase 4, d'autres entrées sont rajoutées, tels que maladies, ravageurs et mauvaises herbes. A cette phase, le système complet est simulé, y compris les interactions avec la plupart des composantes biotiques et abiotiques. Etant donné la complexité du système sol-plante-atmosphère, il n'existe que quelques modèles de culture qui fonctionnent à la phase 4 (Hoogenboom, 2000).

4.3. Les qualités recherchées d'un modèle de culture

Afin de fournir des réponses pertinentes aux questions posées, le développement d'un modèle de culture doit aboutir à l'obtention d'un modèle présentant certaines caractéristiques parmi lesquelles la précision, la sensibilité et la robustesse tiennent une place essentielle. Pour les anglo-saxons, la précision est appréhendée au travers de deux notions : 'accuracy' et 'precision' (Willmott et al. 1985). Le terme 'accuracy' fait référence à la capacité du modèle à obtenir par simulation des valeurs proches des valeurs obtenues par l'expérimentation. La 'precision' fait référence au niveau avec lequel un jeu de données simulées représente une fonction linéaire du jeu de données mesurées correspondant. La sensibilité fait référence à la capacité du modèle à modifier la valeur simulée d'une variable d'état en réponse à la variation d'une ou de plusieurs opérations techniques ou en réponse à la variation des conditions pédo-climatiques (Jeuffroy et al. 2008). Jeuffroy et al. (2008) définissent la robustesse comme la capacité du modèle à ne pas être sensible aux paramètres et aux données qui ne peuvent être facilement appréhendables lors de l'utilisation du modèle. Confalonieri et al (2010) considèrent qu'un modèle est robuste dans la mesure où les performances du modèle utilisé dans de nouvelles conditions sont similaires aux performances du modèle utilisé dans les conditions ayant servi à son développement. Pour Welch et al. (2002), il s'agit de savoir dans quelle mesure les paramètres des modèles sont valides dans d'autres conditions. La robustesse ne peut alors s'évaluer qu'au travers des conditions d'utilisation du modèle de culture.

4.4. Organisation et conception

Comme le montre la figure 06, dans un modèle de culture, la simulation commence par l'introduction d'une série de données spécifiant les conditions initiales environnant la culture, le statut hydrique initial dans le sol, et les paramètres nécessaires pour représenter les caractéristiques physiologiques de la culture. Pour une culture annuelle, le modèle parcourt une série de sous-programmes (appelés « subroutines »), qui simulent les processus de la plante ou du sol à un pas de temps horaire ou journalier, émettant en sortie des valeurs intermédiaires à intervalles spécifiés. Les « subroutines » les plus souvent rencontrées dans un modèle sont: (a) le calcul de la phénologie de la plante en fonction de l'accumulation de température et de la photopériode, (b) calcul de l'accumulation de la matière sèche, (c) calcul du partage et de l'allocation de la matière sèche aux différents organes de la plante, (d) calcul de l'effet des facteurs environnementaux (paramètres climatiques, bilan de l'eau et des

nutriment dans le sol), (e) conditions de gestion de la culture, (f) caractéristiques des cultivars utilisés (White et Hoogenboom, 2010).

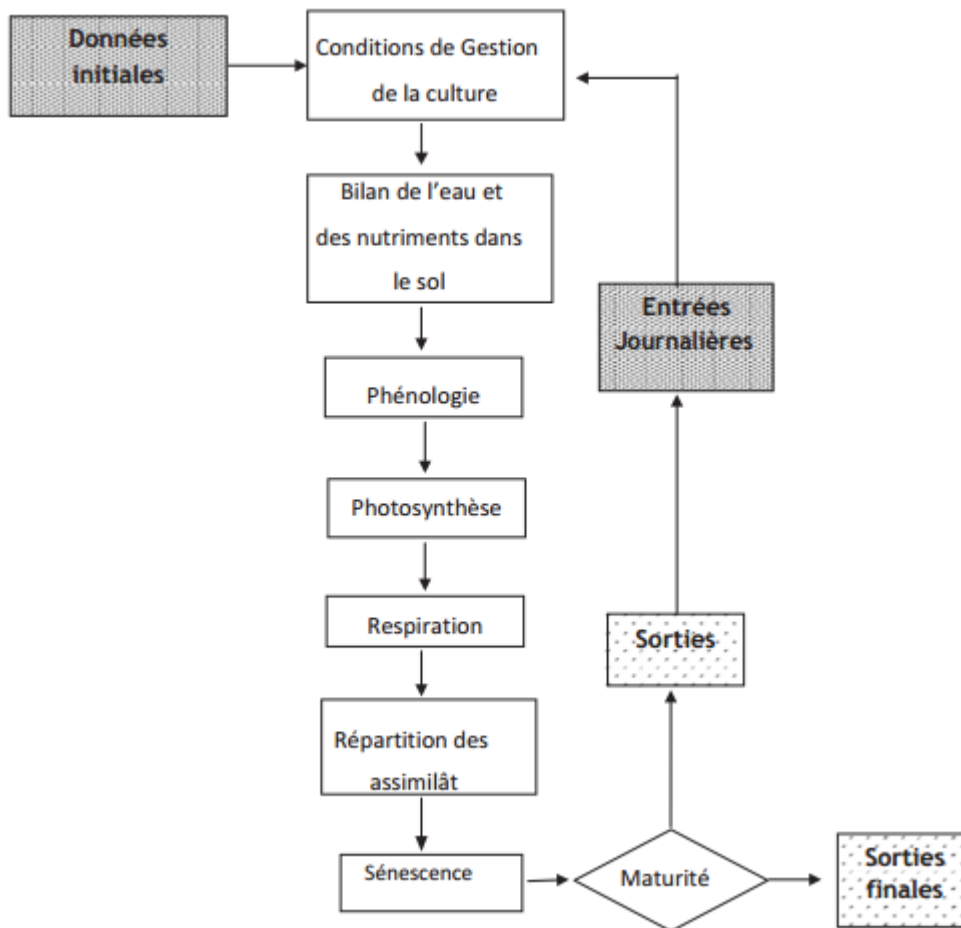


Figure 07 : Organigramme schématisé d'un modèle de culture théorique fonctionnant au pas de temps journalier (source : White et Hoogenboom, 2010).

Partie2

Martiale et méthode

Chapitre 3. Présentation de la région d'étude

Introduction

Le paysage traditionnel du Souf est marqué par la beauté. Beauté spécifique, car l'originalité du Souf, établissement humain créé dans un erg, est grande. Mais sa splendeur n'est pas seulement dans le mouvement des dunes ocre ou blanches de l'erg, elle est aussi dans une création humaine, inattendue (Afra, 2017). El Oued : la ville aux mille coupes, capitale du Souf, son architecture s'y distingue de celle des autres villes sahariennes, Au lieu des terrasses, ce sont des coupes qui couvrent les maisons. Mais ses efforts ne sont pas vains car l'ensoleillement est maximum (Tahraoui, 2014). Le Souf est le nom berbère d'une rivière, synonyme de « Oued ». A l'origine, les habitants d'El-Oued vivaient de la culture de la terre, où chacun avait sa palmeraie et son potager réalisé à l'issue d'une somme d'efforts considérable. La forme de la culture consistait à creuser des cuvettes pour planter à proximité de la nappe phréatique. Cette situation a fait que l'agglomération soit implantée à travers des entonnoirs, rendant tout aménagement planimétrique du terrain difficile et les aménagements plus coûteux (Afra, 2017).

1. Situation géographique

La zone d'étude est située dans la wilaya d'El Oued, l'une de principales oasis du Sahara septentrional algérien. Elle est située au sud-est de l'Algérie, à une distance de 650 km de la capitale, au nord-est du Sahara septentrional et 350Km à l'ouest de Gabes (Tunisie). Elle occupe une superficie de 44586 km², représentant 1,87 % de la superficie du territoire nationale (ANDI ,2014). Elle est limitée par les wilayas :

- A l'Est par la république Tunisienne.
- Au Nord –Est par la wilaya de Tébessa.
- Au Nord par la wilaya de Khenchla et Biskra.
- Au Nord-Ouest par la wilaya de Biskra.
- A l'Ouest par la wilaya de Djelfa.
- Au Sud-ouest et Sud par la wilaya d'Ouargla.

Elle est limitée par les coordonnées géographiques suivantes :

- Longitudes X1 = 05°30' et X2 = 07°00' Est,
- Latitudes Y1 = 35°30' et Y2 = 37°00' Nord.

Traditionnellement, les limites des oasis du Souf sont l'erg oriental jusqu'aux abords du chott Melghir, où s'étire une masse de palmeraies limitée à l'est par la frontière tunisienne et à l'ouest par l'immense oasis de l'Oued-Righ. Les limites de cette oasis atteignent la frontière

libyenne au sud (Voisin, 2004). Cette région se trouve à une altitude moyenne de 80 m, accusant ainsi une diminution notable du sud au nord pour être à 25 m au-dessous du niveau de la mer dans le chott Melghir qui occupe le fond de l'immense bassin du Bas Sahara. Elle possède des dunes qui dépassent parfois les 100 m de hauteur (ANRH, 2009).

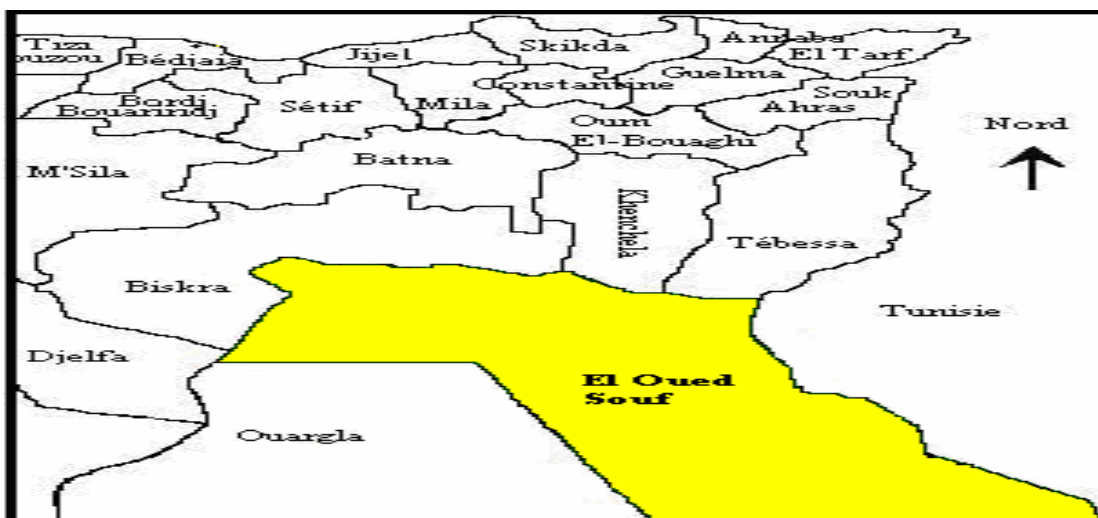


Figure 08 : situation géographique d'ouad souf (photo de google)

2. Les caractéristiques climatiques

La connaissance des caractéristiques climatiques est fondamentale pour permettre une meilleure évaluation des besoins en eau des différentes cultures et une détermination des facteurs qui ont un effet néfaste sur la production et le rendement (Bneder, 1992). La région d'El Oued se caractérise par un climat aride de type saharien désertique, en hiver la température baisse au-dessous de 0°C alors qu'en été elle atteint 50°C ; la pluviométrie moyenne varie entre 80 et 100 mm/an (période d'octobre à février) (Andi, 2014).

Tableau 06: Données climatiques de la région d'El Oued (2008- 2017) (DSA, 2018).

Le tableau 06 synthétise les données climatiques d'El Oued durant la période (2008-2017) :

Paramètres climatiques	Température moyenne. (°C)	Précipitation (mm)	Humidité Relative (%)	Vitesse de vent (m/s)
Mois				
Janvier	11.48	3.87	58.64	5,12
Février	13.03	4.90	48.62	6,68
Mars	17.3	8.48	43.48	6,22

Avril	22.1	8.35	38.5	7,76
Mai	26.64	1.18	32.68	7,68
Juin	31.27	0.68	33.3	9,52
Juillet	34.77	0.20	29.64	7,96
Aout	34.03	0.43	32.68	7,72
Septembre	29.55	9.77	43.78	6,72
Octobre	23.73	3.55	47.12	4,12
Novembre	16.74	7.18	55.52	4,22
Décembre	11.88	2.18	67.44	4,4
Moyenne annuelle	22.71	7.77	44.28	6,48

2.1. Température

La température est un paramètre important dont il faut tenir compte pour la caractérisation d'une région donnée. Selon le tableau 06, notre région d'étude se caractérise par:

- Le mois le plus chaud est juillet avec 34,77° C.
- Le mois le plus froid est Janvier avec 11,48 °C. Une période froide s'étalant de novembre à avril avec une moyenne de 15,42° C.
- Une période chaude s'étalant de mai à octobre avec une moyenne de 29,99° C.

2.2. Précipitations

Dans le Souf, les précipitations sont très faibles et irrégulières. En effet la moyenne des précipitations est de 7,77 mm/an. La pluviométrie est assez variable, fine à torrentielle, très élevée au mois de mars, avril et septembre. Les précipitations restent au-dessous des besoins des cultures et l'irrigation reste indispensable (Tableau 06).

Pour classer le climat d'Oued Souf, nous avons illustré le degré d'aridité par le diagramme ombrothermique de Gaussen.

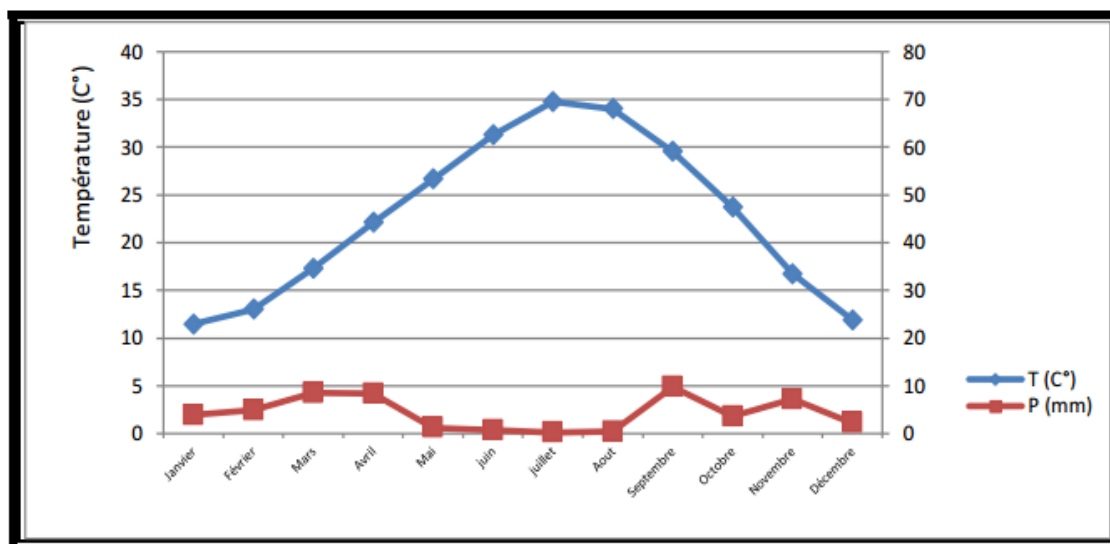


Figure09 : Diagramme ombrothermique de "Gaussen" de la région du Souf (2008-2017).

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen permet de suivre les variations mensuelles de la période sèche, il est représenté à travers une échelle où : $P = 2T$.

L'aire comprise entre les deux courbes (Figure08) représente la période sèche. Dans la région du Souf, cette période s'étale sur toute l'année.

2.3. Humidité relative de l'air

La région du Souf se caractérise par un air sec. Avec une humidité moyenne annuelle de 44.28 %. Le taux d'humidité relative varie d'une saison à l'autre. La valeur de l'humidité moyenne maximale dans la région du Souf est enregistrée pendant le mois de Décembre avec 67.44 % et la valeur de l'humidité moyenne minimale dans cette région est enregistrée pendant le mois de Juillet avec 29.64 % (Tableau 06).

2.4. Vents

Le vent est le composant climatique le plus marquant dans la région du Souf, c'est un facteur important à considérer dans l'agriculture. Il joue un rôle essentiel dans le phénomène de pollinisation, comme il peut provoquer le flétrissement de certaines espèces végétales sensibles. Selon le tableau 06, les vents sont fréquents durant toute l'année. Les vitesses les plus élevées sont enregistrées durant la période allant de février jusqu'à août, La vitesse moyenne est de 6.48 m/s; avec un maximum de 9.52 m/s durant le mois de juin. Généralement, c'est au printemps que les vents sont les plus forts et sont chargés de sable, avec une vitesse pouvant aller de 6 à 9 m/s. Ces vents violents peuvent produire des effets préjudiciables sur les cultures de la région, et engendrer une dynamique érosive éolienne

intense. Pour échapper à cette situation dégradante, il serait utile d'envisager l'installation d'une protection climatique, en vue de réduire les effets des conditions climatiques sévères.

2.5. Evaporation

L'évaporation est importante, pouvant atteindre atteignant à Oued Souf une ampleur considérable, car ce phénomène physique rencontre ici les conditions nécessaires optimales. Selon ONM El Oued Guemar (2015) la moyenne annuelle est de 2244,85 mm, le maximum est atteint au mois de juillet, avec une moyenne de 333,95 mm, avec des minima enregistrés durant mois de décembre avec une valeur de 78,65 mm. L'évaporation est favorisée par les fortes températures et les vents desséchants fréquents. Elle correspond aussi à la pluviométrie annuelle. Cette situation traduit un écart très important entre l'évaporation et les précipitations, ce qui engendre un déficit hydrique considérable, justifiant les forts besoins en eau des cultures.

2.6. Insolation

A cause de la faible nébulosité de l'atmosphère, la quantité de lumière solaire est relativement forte, ce qui a un effet desséchant, tout en augmentant la température (Ozenda, 1983). Les durées d'insolation sont évidemment très importantes au Sahara et varient assez notablement d'une année à l'autre, et même suivant les périodes de l'année envisagées (Meissa ,2016). Selon ONM El-Oued Guemar (2015), la durée moyenne d'insolation est d'environ 277,29 heures, avec un maximum de 358,89 heures en juillet, et un minimum de 220,06 heures en décembre. En effet, les fortes insolutions dans la région d'Oued Souf contribuent à l'augmentation considérable de l'évapotranspiration, justifiant des besoins en eau importants des cultures, qui doivent être comblés par l'irrigation.

3. Relief

Le Souf est la partie nord orientale du grand erg, elle englobe l'aire dépressionnaire des grands chotts. La géomorphologie et les paysages permettent de distinguer trois sous régions du Nord au Sud (Nadjah, 1971). - Au nord des chotts, les vastes piémonts parcourus par les Oueds descendants des Aurès, correspondants au sud Némemcha et constituant une zone traditionnelle de parcours pour les Soufis. - Au sud des chotts, on trouve dans les marges de l'erg, des placages de sable dans une grande épaisseur, mais modelés en bras nord-est et sud-ouest, séparés par des dépressions riches en végétation. Les oasis sont limitées par des cordons de dunes, qu'on appelle des sahanes. En dessous du 33° parallèle Nord, commencent les grandes accumulations sableuses en pyramides formant de grandes dunes, les Ghroudes. Elles sont moins nombreuses et séparées par de larges sahanes au sud-ouest, dans la zone dite

Loudje, dont la végétation psammophile est abondante et offre de bons pâturages. Au Sud-Est, dans le Zemoul El Akbar, les Ghroudes sont plus resserrées et plus nombreuses et la circulation y devient très difficile (Tria, 2011).

4. Pédologie

La région d'El Oued est caractérisée par des sols légers, à prédominance sablonneuse, à structure particulière. Ces sols sont connus par de faibles taux de matière organique. L'autre aspect est appelé localement « Shounes » (plusieurs Sahane), où la surface du sol est parfois caillouteuse avec des croûtes gypseuses entourées par de hautes dunes (Ghroud) qui leur donnent ainsi une forme de cratères (Achour, 1995). Les résultats de l'étude géophysique de la terre d'El Oued permettent de caractériser quatre étages (ENAGEO, 1993) :

- Terrain superficiel, d'une épaisseur variable, allant de 30 à 50 m, correspondant aux sables dunaires.
- Terrain ayant une épaisseur variable, allant de 50 à 80 m, correspondant aux sables argileux et aux argiles sableuses.
- La troisième couche n'existe pas dans toute la région, son épaisseur est plus importante et varie entre 5 à 90 m, elle correspond aux argiles sableuses.
- La quatrième couche correspond au substratum argileux.

5. Aspect hydrogéologique

La wilaya d'El Oued qui fait partie du Sahara septentrional recèle dans son sous-sol d'importantes réserves en eau contenues dans des aquifères superposées de la nappe phréatique dite libre à la nappe la plus profonde dit albien (la vallée du Souf et sa périphérie puisent son eau dans les nappes profondes suivantes :

5. 1. La nappe du complexe terminal

La zone de production de cette nappe se situe entre 200 et 500 m. Le débit moyen par forage varie entre 25 et 35 l/s avec une qualité chimique de 2 à 3 g/l de résidu sec. Le niveau hydrostatique de la nappe oscille entre 10 et 60 mètres selon les zones (ANRH, 2009).

5. 2. La nappe du continental intercalaire

La nappe du continental intercalaire est captée à une profondeur moyenne de 1900 m, l'eau de cette nappe se distingue par sa température très élevée atteignant plus de 60 °C, et un résidu sec de 2 à 3 g/l (ANRH, 2009).

5. 3. Constat sur l'exploitation des nappes CI-CT

La nappe phréatique s'étale sur presque la quasi-totalité du territoire de la vallée. Elle est exploitée par environ 10.000 puits traditionnels à une profondeur moyenne de 40 m. Le

recours aux forages profonds pour l'irrigation a engendré un problème néfaste pour l'environnement dans certaines zones de la vallée, notamment la remontée des eaux dans le Souf. Cette situation a perturbé l'écosystème des oasis de la vallée considéré déjà assez fragile. (ANRH, 2009).

6. Topographie

Selon Maissa (2016), La vallée du Souf est caractérisée par une topographie plane, monotone et sans exutoire ; le site où se trouve la ville d'El Oued est caractérisé topographiquement par une faible pente. Par conséquent, cette situation crée des problèmes d'évacuation des eaux, notamment dans la ville d'El Oued. Cette région est sablonneuse. L'altitude moyenne de la région du Souf est de 80 mètres avec une diminution notable du sud au nord pour atteindre 25 mètres au-dessous du niveau de la mer dans la zone des chotts qui occupent le fond de l'immense bassin du bas Sahara (ANRH,2009).

7. La flore et la faune

7.1. La flore

Des arbustes rabougris et des touffes d'herbes espacées croissent aux pieds des dunes, le Souf n'est pas une région stérile mais une région aride. La flore spéciale est caractérisée par un certain nombre de traits déterminés qui sont : la rapidité d'évolution, l'adaptation au sol et au climat, le petit nombre des espèces, le caractère discontinu du matériel végétal (Ozenda, 1977). Les principales plantes caractéristiques du Souf sont : Le Drinn (*Aristida pungens*), l'Alenda (*Ephédra alata*), l'Arta (*Calligonum comosum*), le Retem (*Retama retam*), l'Adhide (*Euphorbia guyoniana*), le Genêt (*Genista saharae*), l'Ethel (*Tamarix articulata*), le Saxaoul (*Anabasis ammodendron*).

7.2. La faune

Les deux principaux embranchements représentés dans le Souf, sont les articulés (Insectes, arachnides) et les vertébrés (mammifères, oiseaux, reptiles). Si tout le monde connaît le lézard, le scarabée, le scorpion, le fennec et la gerboise, on est plutôt surpris d'apprendre qu'il existe plus de 20 espèces d'oiseaux (Voisin, 2004).

8. Milieu socio –économique

La wilaya d'El oued dispose des ressources naturelles abondantes (la terre, les ressources hydriques et l'énergie) qui sont appelées à jouer un grand rôle dans son développement.

▪ Densité et peuplement

La population totale de la wilaya est estimée à 820000 habitants, soit une densité de 18.39 habitants par Km² (DPAT, 2016). Une grande partie de la population est concentrée dans les communes : d'El Oued, Reguiba, Guemar, Ouermes, Djamaa, El Meghier. Elle est

caractérisée principalement par la jeunesse car plus de la moitié à moins de 20 ans et nombre au l'état de croissance continue. Le nombre de population active est de 295385 habitants. Le Nombre de chômeurs est de 29535 habitants (DPAT, 2016).

▪ Emploi

Tableau 07 : Répartition de la population par branches d'activités dans la wilaya de El-Oued (DPAT, 2016).

Branche d'activité	Nombre d'actifs	%
Agriculture	127620	48
Commerce et services	35660	13
Industrie et Administration	33225	13
Bâtiment et travaux publics	31370	12
Autres	38480	14
Total	266355	100

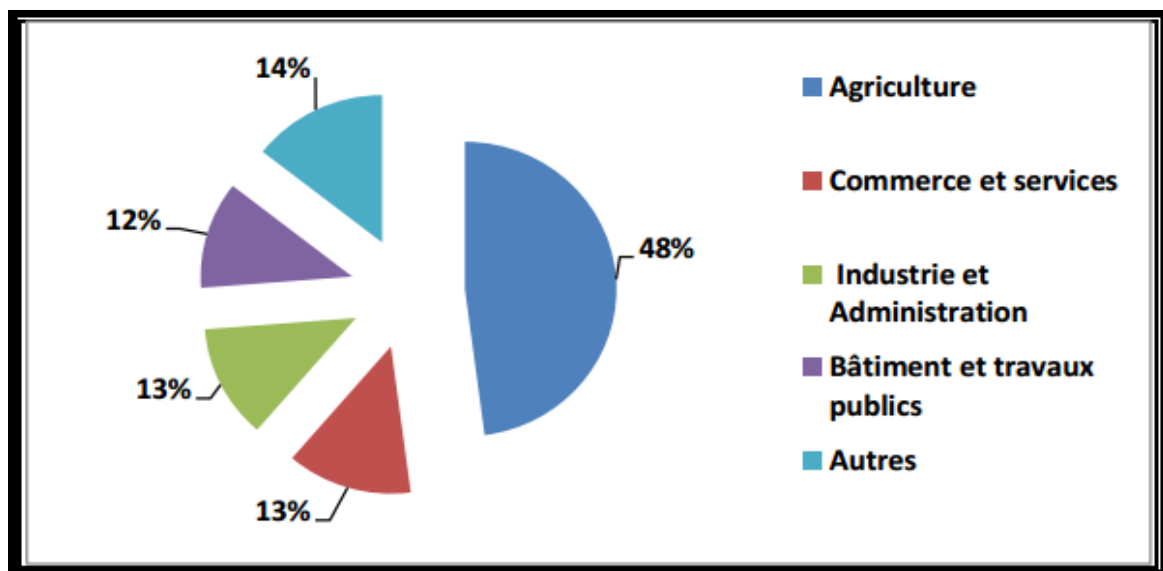


Figure 10 : Répartition de la population par branches d'activités

L'agriculture constitue la première activité par rapport les autres branches dans la wilaya d'El Oued, donc la région du Souf est une vocation fortement agricole. L'agriculture emploie 48% de la population occupée (DPAT, 2016). Actuellement, l'agriculture est en plein développement à la faveur des résultats enregistrés, ces dernières décennies ; en effet ce secteur représente un facteur très important en termes de développement économique et sociale (création d'emplois, l'accroissement de la surface des zones exploitées).

9. Potentiel agricole

▪ Structures agricoles de la wilaya

Tableau 08 : répartition générale des terres de la wilaya EL-oued (DPAT, 2016)

Désignation		Superficie (ha)
Terres utilisées par l'agriculture	Superficie agricole utile (S.A.U)	95000
	Pacages et parcours	1410000
	Terres improductives des exploitations agricoles	214600
S/total terres utilisées par l'agriculture (S.A.T)		1719600
Autres terres	Terrains improductifs non affectés à l'agriculture	2738666
Superficie totale de la wilaya		4458680

La wilaya d'El-oued constitue d'une source très remarquable en matière de production végétale. La superficie agricole totale couvre un espace de 1719600 hectares avec une surface agricole utile (S.A.U) de 95000ha. Parallèlement, on rencontre les pacages et parcours d'une superficie égale à 1410000 ha, et jointe à celle-ci une superficie de 214600 ha considérés comme des terres improductives, organisées à l'intérieur des exploitations agricoles à l'exemple des bâtiments, des chemins, et de pistes. Dans tout l'espace de la wilaya, on recense une superficie de 2738666 ha de terres improductives non affectées à l'agriculture ; s'expliquant par les couvertures des agglomérations en bâtiments, voies de communications, et les terres non susceptibles d'être cultivées ou transformées en parcours. Selon DSA (2019), Les bonnes potentialités agricoles participer à la production de la wilaya dans divers produits, la production est dominée par la phoeniculture et les cultures maraichères, telles que la pomme de terre et la tomate à grande échelle. La priorité est donnée aux cultures maraichères de superficie exploitée égale à 49440 ha, finalisant une production totale de 16214813 qx (DSA, 2019).

La région du Souf a occupé le premier rang à l'échelle national dans la production de pomme de terre qui estimée 1136000qx (DSA, 2018). Ces spéculations sont d'une importance capitale pour l'obtention d'un gain lucratif de la part du bilan pécunier annuel, et ce pour redevance en partie des échanges.

Chapitre 4. Modèle AquaCrop

1. Description du modèle AquaCrop

L'estimation de la production qui peut être obtenue en conditions de limitation d'eau est capitale dans les environnements arides, semi-arides et sujets à la sécheresse. Afin de faire face à cette exigence, la FAO a développé un logiciel pour la simulation de la réponse productive des cultures herbacées à la disponibilité hydrique, nommé AquaCrop (Steduto *et al.* 2009). Comme de nombreux autres modèles de croissance des cultures, Aqua-Crop est constitué d'une structure qui comprend quatre sous-modèles: le sol, avec son équilibre hydrique; la culture, avec son développement, sa croissance et son rendement; l'atmosphère, avec son régime thermique, les précipitations, la demande par évaporation et la concentration de dioxyde de carbone (CO₂); et la gestion, avec ses pratiques agricoles majeures telles que l'irrigation et la fertilisation (Geerts *et al.* 2009). Par rapport à d'autres logiciels, AquaCrop nécessite un nombre significativement plus faible de paramètres, atteignant un équilibre entre simplicité, précision et robustesse (Araya *et al.* 2010). AquaCrop simule l'agriculture pluviale, l'irrigation supplémentaire, déficitaire et totale. Les simulations peuvent être conduites en jours ou sur la base du régime thermique. La version finale d'AquaCrop prendra en considération l'azote et la salinité du sol. (Andarzian *et al.* 2011).

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

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

L'équation du cœur du moteur d'Aquacrop est :

$$B=WP.\Sigma Tr$$

Où (B) est la quantité de biomasse aérienne produite ; (Tr) est la transpiration de la culture (en mm) et (WP) est le paramètre de productivité de l'eau (Kg de biomasse par m² et par mm d'eau transpirée et cumulée au cours de la période dans laquelle la biomasse est produite) (Raes et al. 2011)

2. Les relations entre les différents composants du modèle

La figure10, indique les principales composantes du continuum sol-plante atmosphère et les paramètres qui commandent la phénologie, le couvert végétal, la transpiration, la production de biomasse et le rendement final. [I, de l'irrigation; Tn, température minimale de l'air; Tx, température maximale de l'air; ETo, l'évapotranspiration de référence; E, l'évaporation du sol; Tr, la transpiration de la canopée; GS, la conductance stomatique; WP, la productivité de l'eau; IR, l'indice de récolte ; le CO₂, la concentration de dioxyde de carbone atmosphérique; (1), (2), (3), (4), les fonctions de réponses au stress hydrique, respectivement, de la croissance des feuilles, la sénescence, la conductance stomatique et l'indice de récolte]. Les lignes continues indiquent des liens directs entre les variables et les processus. Les lignes pointillées indiquent les effets rétroactifs.

La teneur en eau dans la zone des racines est simulée à travers la quantification des flux d'eau en entrée et en sortie du système, considérant le sol comme un réservoir d'eau constitué par plusieurs couches. Aqua Crop utilise le pourcentage de couverture du sol au lieu de l'indice foliaire. La réponse de la culture au stress hydrique est modulée par le développement de la couverture foliaire, la conductance stomatique, la sénescence et l'indice de récolte. La simulation de la transpiration détermine l'accumulation journalière de biomasse, au moyen de la productivité de l'eau de la culture. Ce dernier paramètre est normalisé pour l'évapotranspiration de référence et pour le CO₂, permettant de faire des simulations en zones et périodes différentes, ainsi que pour des scénarios climatiques futures (Steduto et al. 2012).

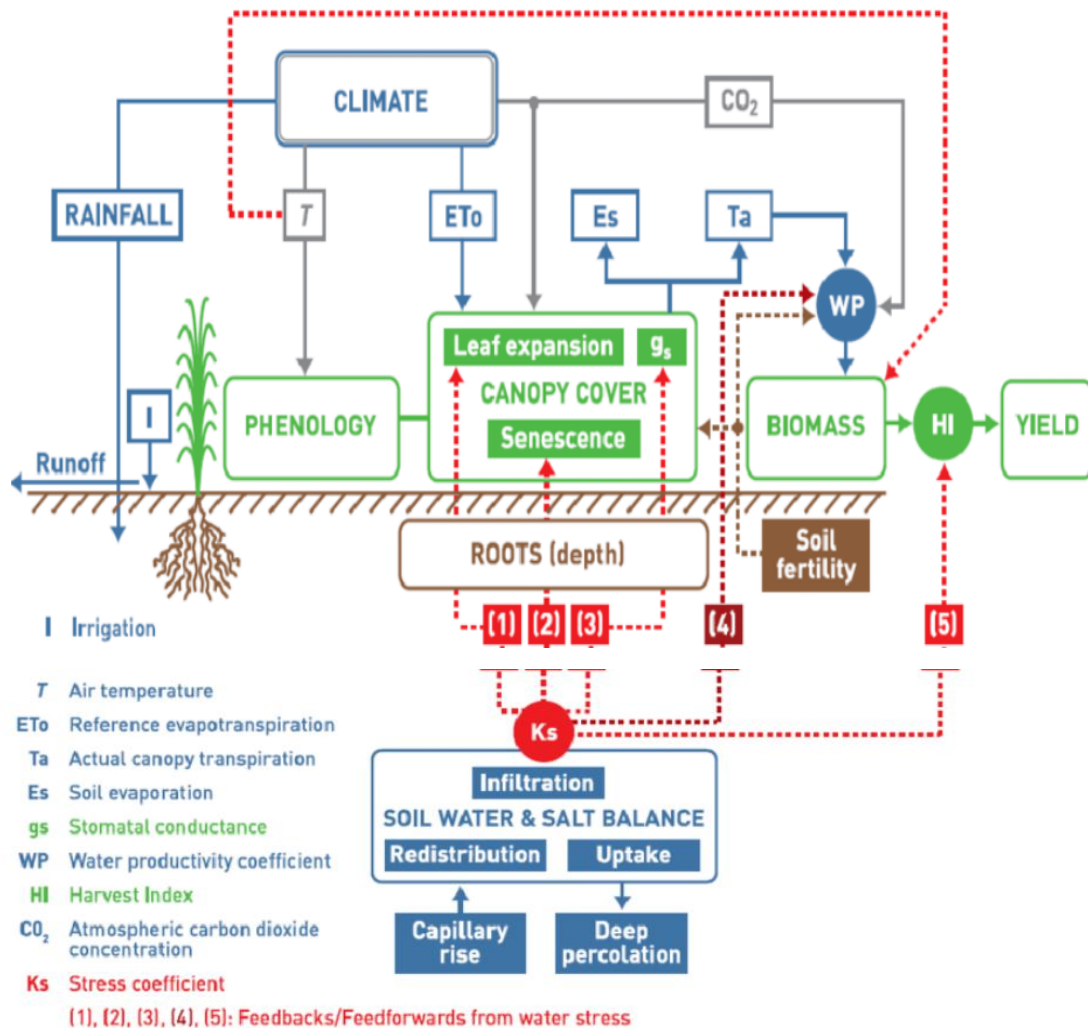


Figure11: Les relations fonctionnelles entre les différents composants du modèle (Steduto et al. 2012).

Ce modèle a une structure modulaire évolutive. Il est organisé sous forme de plusieurs modules représentant chacun, un ou plusieurs processus liés au système solplante-atmosphère. Chaque module fait appel à un certain nombre de sousprogrammes (ou sous-modules) traitant des mécanismes spécifiques. Le premier ensemble, intitulé « Environnement », est composé de quatre modules, et a pour but le traitement du climat, de la culture, de la gestion et du composant sol. Le second ensemble est composé de deux modules qui décrivent la période de simulation et les conditions initiales. Enfin, le troisième ensemble, dit « projet », constitue l'étape finale du traitement des données (Figure10)



Figure 12 : L'organigramme des différents modules du modèle AquaCrop (Raes et al.2009).

3. Les Données D'entrees

Selon Raes et al. (2009), Aqua Crop utilise un nombre relativement réduit de paramètres explicites et de variables d'entrée (souvent intuitives), qui sont facilement disponibles ou qui nécessitent des méthodes simples pour leur détermination (Figure12).

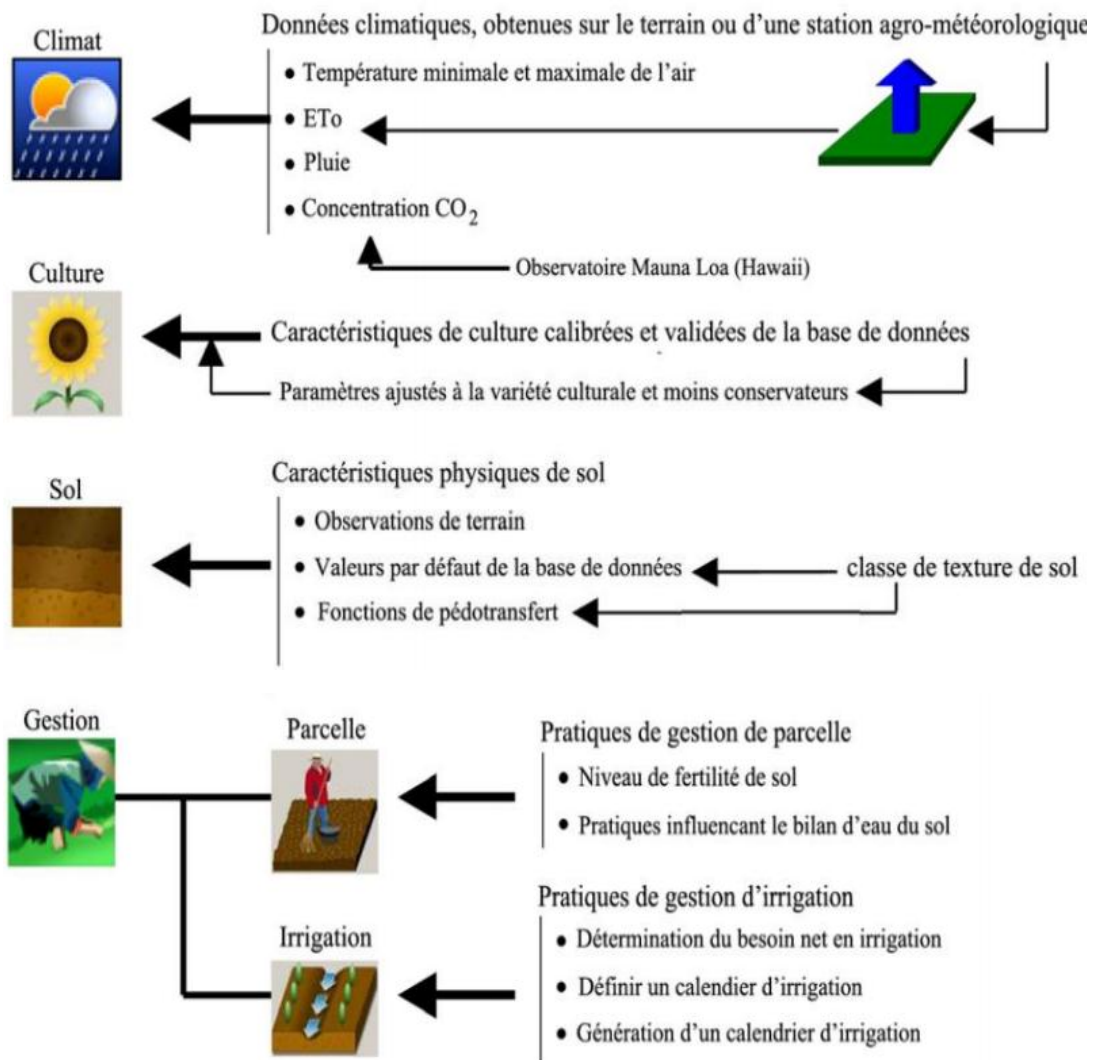


Figure 13: Données d'entrée définissant l'environnement dans lequel la culture va se développer (Raes et al. 2009).

3.1. Données climatiques

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

3.2. Caractéristiques des cultures

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

3.3. Caractéristiques du sol

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

3.4. Pratiques de gestion

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

Dans la gestion de l'irrigation c'est à l'utilisateur de choisir si la culture est pluviale ou irriguée. Si irriguée, l'utilisateur peut sélectionner la méthode d'application (aspersion, goutte à goutte, ou de surface), la fraction de surface mouillée, est à préciser pour chaque événement d'irrigation, la qualité de l'eau d'irrigation, le calendrier et le montant d'irrigation appliquée. Il existe également des options pour évaluer le besoin en irrigation net et de générer des programmes d'irrigation en fonction du temps spécifié et les critères de profondeur. Étant donné que les critères pourraient changer au cours de la saison, le programme fournit les

moyens de tester des stratégies d'irrigation déficitaire en appliquant des quantités d'eau choisis à divers stades de développement des cultures (Raes et al. 2009).

3.5. Simulation des besoins en eau d'irrigation

La quantité d'eau nécessaire pour compenser la perte par évapotranspiration du champ cultivé est définie comme le besoin en eau de la culture. Les besoins en eau peuvent être satisfaits par l'eau du sol stockée, les précipitations et l'irrigation. L'irrigation est nécessaire lorsque la demande en eau des cultures dépasse l'approvisionnement en eau provenant de l'eau du sol et des précipitations.

Le besoin net d'irrigation est la quantité d'eau nécessaire pour que la teneur en eau du sol de la zone racinaire revienne à la capacité du champ et représente la différence entre le besoin en eau de la culture et les précipitations effectives. Les besoins en eau d'irrigation comprennent également de l'eau supplémentaire pour le lessivage des sels et pour compenser la non-uniformité de l'application de l'eau (tiré de : Croyevapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56 ; Allen et al. 1998).

Les besoins en eau d'une culture doivent être satisfaits pour atteindre les rendements potentiels. Par conséquent, pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture, l'irrigation nette et les besoins en eau de la pomme de terre ont été estimés à l'aide du modèle AquaCrop. Comme aucune gestion spécifique du champ n'a été sélectionnée, la culture s'est développée sous une fertilité complète (pas de stress de fertilité). Comme aucune teneur en eau initiale du sol n'a été spécifiée, le profil du sol le premier jour de la simulation a été supposé correspondre à la capacité du champ. Quatre conditions environnementales différentes pour la pomme de terre ont été simulées :

- **Scénario réel** : saison culturale caractérisée par l'ensemble de données météorologiques le plus actuel et le plus complet (année : 2013) et, par conséquent, il peut être considéré comme le scénario de référence ; noté : "scénario réel" ;

- **Scénario Nr.1** : saison de culture caractérisée par un manque de précipitations (année extrêmement sèche : année 2001) ; dénoté : "Scénario de simulation Nr.1 : année sèche".

- **Scénario n° 2** : saison de culture caractérisée par une augmentation des températures MAX et MIN de l'air de 2 °C ; dénoté : "Scénario de simulation n° 2 : augmentation de la température de l'air ;".

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

- Les données climatiques donneront les informations nécessaires concernant les besoins en eau de la culture ;
- Les paramètres pédologiques permettront d'estimer la réserve utile du sol ;
- Les données culturales préciseront la réserve en eau facilement utilisable par la plante, sur la base de sa profondeur racinaire.

1. Les données climatiques

Les données climatiques requises par les modèles AquaCrop et CropWat sont les températures minimales, maximales (°C), les précipitations (mm), la vitesse du vent (m/s) à 2 m au-dessus du sol, la radiation solaire (W /m²) et l'humidité relative (%). Ces données ont été récoltées à travers des bulletins de l'ONM et des sites météorologiques s'étalent sur une période de 16 ans (1997-2013). Les mesures prises, à un pas de temps mensuel.

2. Les données liées à la culture

Cette culture est pratiquée dans le monde entier mais revêt une importance particulière dans les climats tempérés. La production mondiale actuelle est d'environ 308 millions de tonnes de tubercules frais provenant de 19 millions d'hectares (FAOSTAT, 2001). Les rendements sont affectés par la température et les températures moyennes journalières optimales sont de 18 à 20°C. En général, une température nocturne inférieure à 15°C est nécessaire pour l'initiation des tubercules. La température optimale du sol pour une croissance normale des tubercules est de 15 à 18°C. La croissance des tubercules est fortement inhibée lorsque la température est inférieure à 10°C et supérieure à 30°C. Les variétés de pommes de terre peuvent être regroupées en variétés précoces (90 à 120 jours), moyennes (120 à 150 jours) et tardives (150 à 180 jours).

La densité de plantation a été fixée selon Ameur, 2011 à 52 000 plantes/ha (5,2 plantes/m²) avec un espacement entre les rangs et les plantes de 0,75 m et 0,25 m respectivement, tandis que le couvert végétal initial (CCo) a été estimé à 0,78 %.

La couverture maximale de la canopée a été fixée à 92 %, tandis que le cycle de croissance a été fixé comme suit :

- du jour 1 après la transplantation à la reprise : 16 jours

- du jour 1 après le repiquage à la canopée maximale : 56 jours

- du jour 1 après le repiquage à la sénescence : 90 jours

- du premier jour après le repiquage à la maturité : 121 jours.

Le début de la formation du rendement a été fixé à 47 jours après le repiquage, tandis que la profondeur maximale d'enracinement effectif a été fixée à 0,6 m, conformément aux périodes de croissance de la pomme de terre de la FAO et aux informations fournies par les experts locaux. D'autres paramètres de culture plus conservateurs ont été laissés à leurs valeurs par défaut.

3. Les données liées au sol

Le modèle AquaCrop réalise un bilan hydrique qui inclut les processus de ruissellement, d'infiltration, de redistribution ou de drainage interne, de percolation profonde, de remontée capillaire, d'absorption, d'évaporation et de transpiration. Un bilan hydrique quotidien du sol permet de suivre les flux d'eau entrants et sortants aux limites de la zone racinaire et l'eau du sol stockée et retenue dans la zone racinaire.

Les caractéristiques physiques du sol dans la région d'El Oued sont listées dans le Tableau 09. Ces valeurs ne sont qu'indicatives, elles ne sont donc pas destinées à remplacer les mesures in-situ si elles sont disponibles.

Tableau 09: Caractéristiques physiques du sol

Paramètre	Description	Valeur	Unité
Classe de texture		Sable	-
Sable		96	%
Argile		2	%
Matière organique		1	%
Densité apparente matricielle		1.47	g/cm ³
Horizon de sol		1	Nr
Epaisseur		1	m
Pfp	Point de flétrissement permanent	1.4	%
Cpt	Capacité de terrain	4.9	%
Sat	saturation	44.6	%
Etd	Eau total disponible	35	mm
Chs	Conductivité hydraulique saturée	3931.44	mm/jour
Cd	Caractéristique de drainage	1	-
Nc	Numéro de courbe	65	-
Efé	Eau facilement évaporable	7	-

Partie 3

résultat et discussion

1. Analyse les paramètres climatiques

1.1. Pluie annuelle

La figure 14 illustre la variabilité interannuelle des précipitations au cours de la série climatique (1978 à 2018).

Les résultats obtenus montrent une variation hétérogène des intensités des précipitations sur la zone d'étude. La valeur moyenne estimée est d'environ 69,09 mm, oscillant entre 230,6 mm et 21 mm. L'analyse de ce graphique nous a permis de déterminer l'année excédentaire (2009/2010), l'année déficitaire (2000/2001) et l'année normale (2012/2013) afin d'évaluer la variabilité interannuelle des besoins en eau d'irrigation de la pomme de terre.

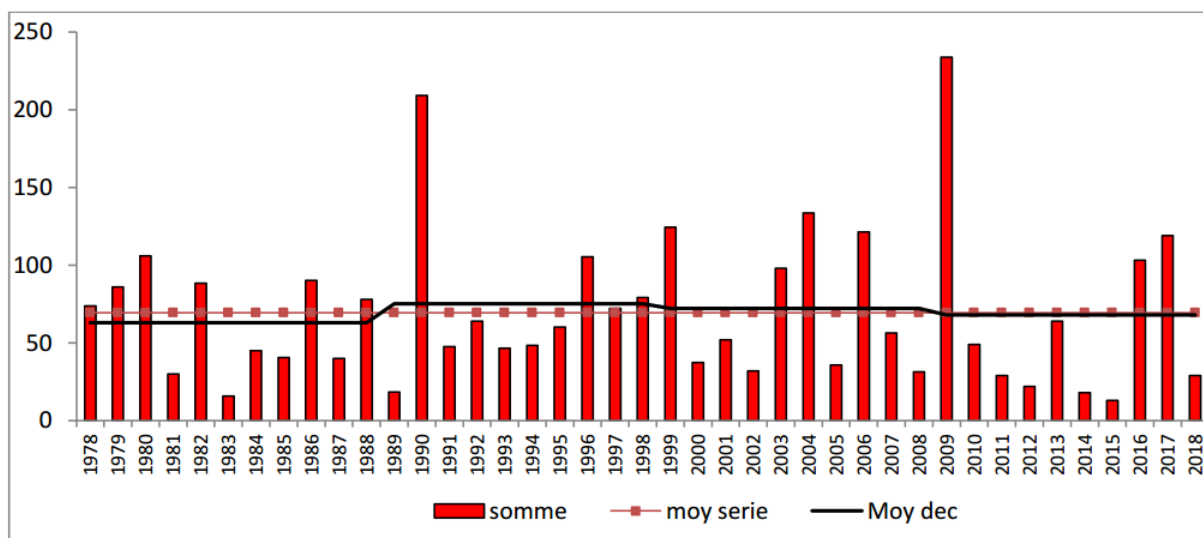


Figure 14. Variabilité interannuelle des précipitations (1997-2018)

1.2. Température moyenne annuelle

La figure 15 illustre la variabilité interannuelle des températures moyennes au cours de la série climatique (1978 à 2018).

Les résultats obtenus montrent une variation homogène de température sur la zone d'étude. La valeur moyenne estimée est d'environ 34°C (1978-2008).

On note que la température diminue à 30°C à partir de l'année 2008 et l'année 2001 est l'année la plus chaude et l'année 2009 l'année la moins chaude.

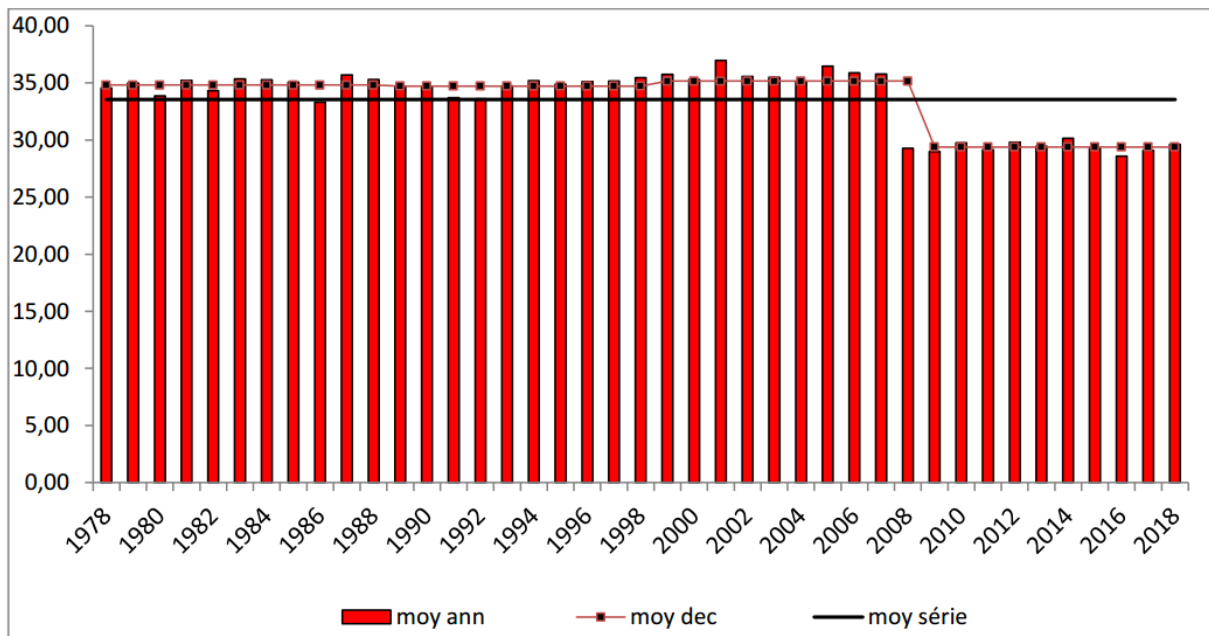


Figure 15. Variabilité interannuelle des températures moyennes (1978/2018)

1.3. Humidité relative

La figure 16 illustre la variabilité interannuelle d’humidité relative au cours de la série climatique (1978 à 2017).

On note que l’humidité moyenne interannuelle est environ de 48% et l’année 2017 c’est l’année la plus humide environ 58% par contre la moins humide coïncide avec l’année 2010 avec 40%.

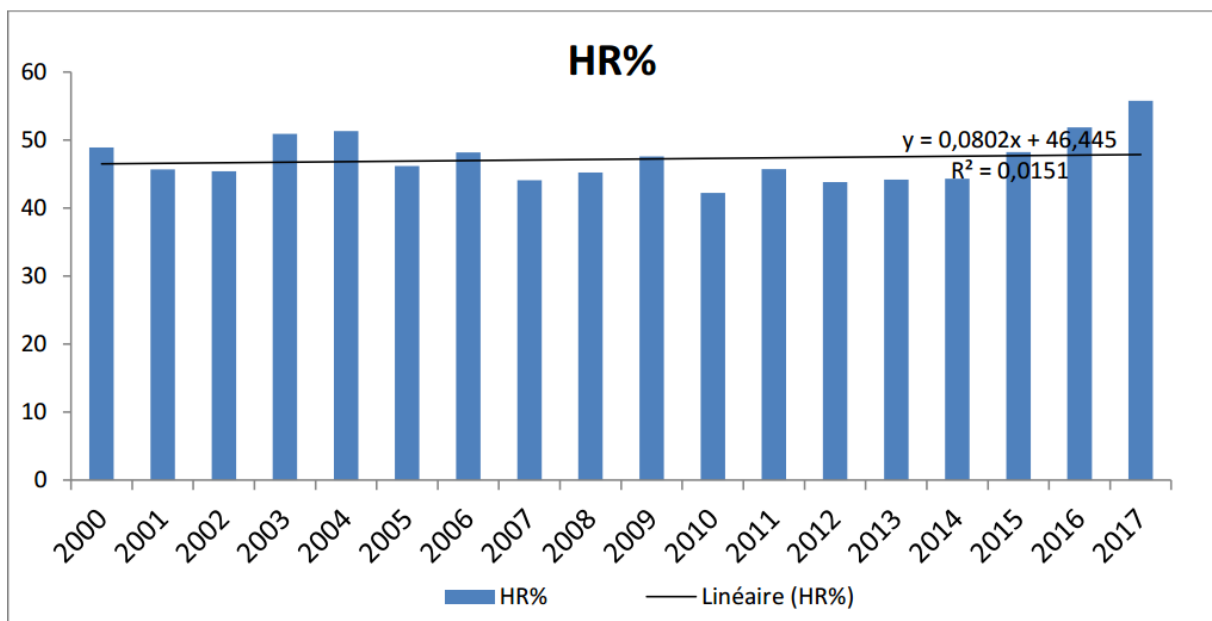


Figure 16. Variation interannuelle de l’humidité relative

1.4. Evapotranspiration

L'évapotranspiration de référence (ET₀) a été calculée en utilisant la méthode FAO Penman-Monteith. Cela nécessite comme données d'entrée la température (minimum et maximum), l'humidité (minimum et maximum) ainsi que le rayonnement solaire et la vitesse du vent à 2 mètres au-dessus du sol. La figure 17 montre la variation interannuelle de l'évapotranspiration de référence (ET₀), on note que la moyenne annuelle de l'ET₀ est d'environ 1528,8 mm, oscillant entre 1307,2 mm et 1755,8 mm.

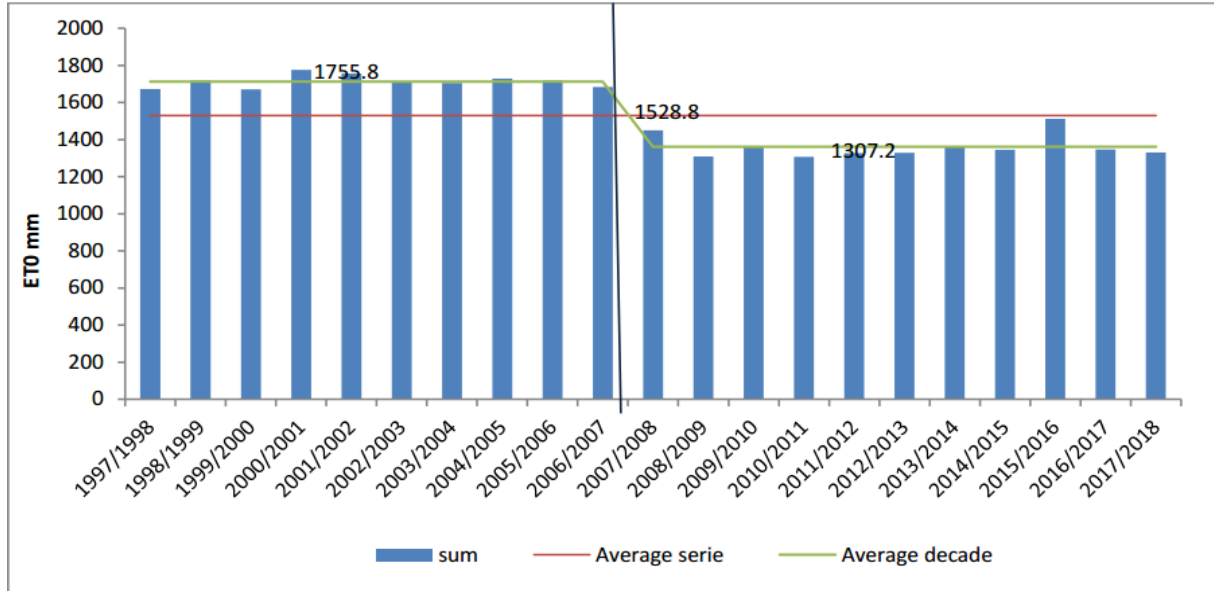


Figure17. Variation interannuelle de l'évapotranspiration

1.5. Pluie efficace

Les pluies efficaces bénéficiées par la culture de a pomme de terre est illustrées par la figure 18. Il est constaté que la moyenne de la pluie efficace durant la sain de culture de la pomme de terre est de l'ordre de 150 mm à 2013.

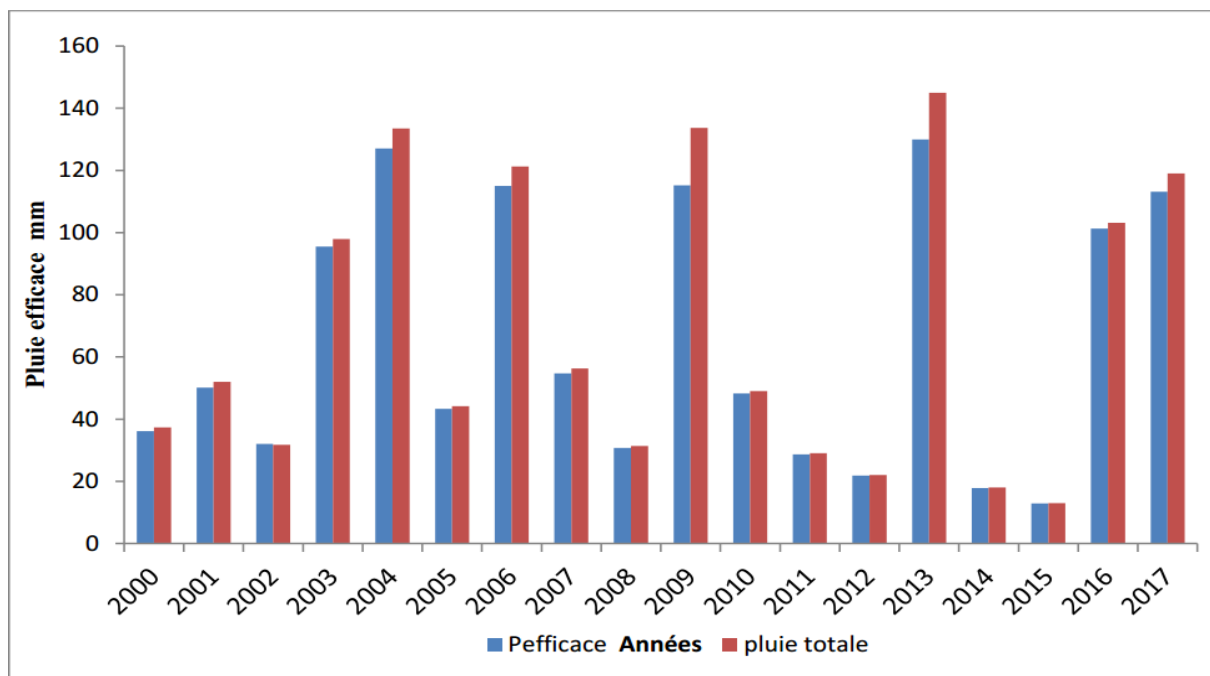


Figure 18. Variation interannuelle de la pluie efficace

2. Analyse des scénarios proposés

2.1 Évaluation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures pour la campagne agricole 2009

La simulation de la saison agricole 2009 a été considérée comme un scénario de référence car la valeur annuelle moyenne des précipitations pour la période 1997-2013 (143,17 mm) était très proche de la pluviométrie annuelle de l'année 2013 (145,1 mm) comme indiqué sur la figure 17.

Sur la figure 19, les besoins quotidiens en eau des cultures de pommes de terre simulés et les besoins nets d'irrigation qui en résultent pour la période de culture 01.02.2013 -01.06.2013 sont signalés. Pour une meilleure compréhension des principaux composants influençant le bilan hydrique du sol, les valeurs quotidiennes d'évapotranspiration de référence, de précipitations, de température maximale et minimale de l'air ont été ajoutées à la figure ci-dessous.

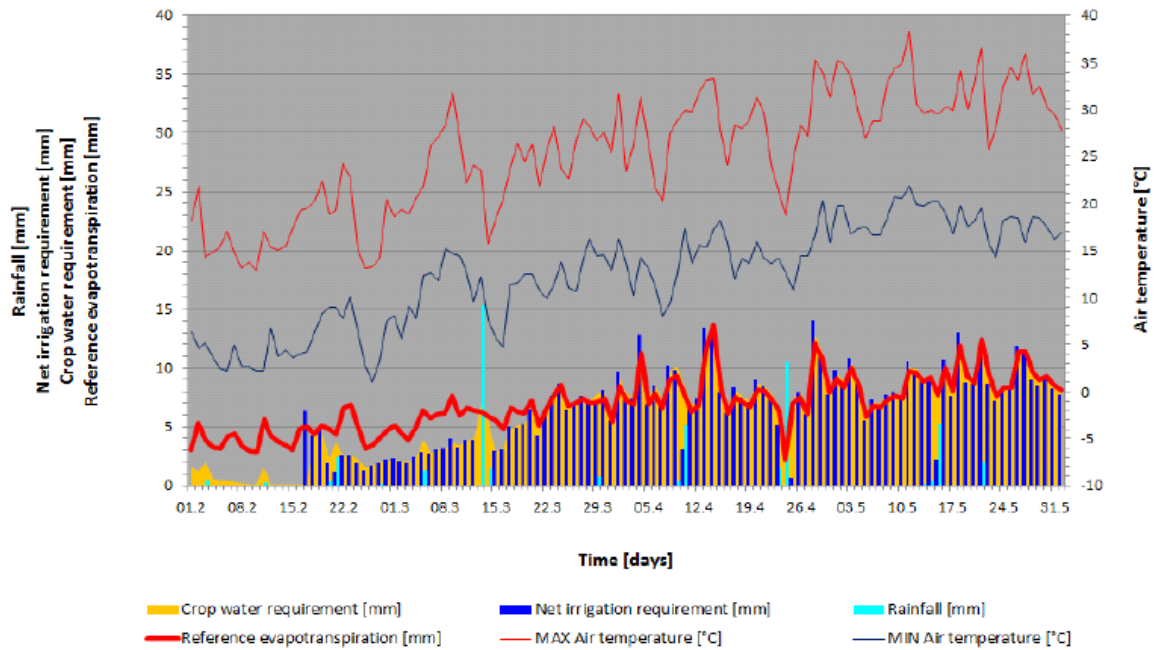


Figure 19. Simulation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures (culture: pomme de terre)

La première partie de février a été caractérisée par quelques événements pluvieux et, par conséquent, une quantité supplémentaire d'eau grâce à l'irrigation n'était pas nécessaire. A partir de la deuxième partie de février et jusqu'à la fin de la période de culture, l'irrigation devient indispensable pour répondre aux besoins en eau des cultures. En analysant la distribution mensuelle des précipitations de l'année 2013, les pénuries de précipitations peuvent être facilement observées comme le montre la figure 20.

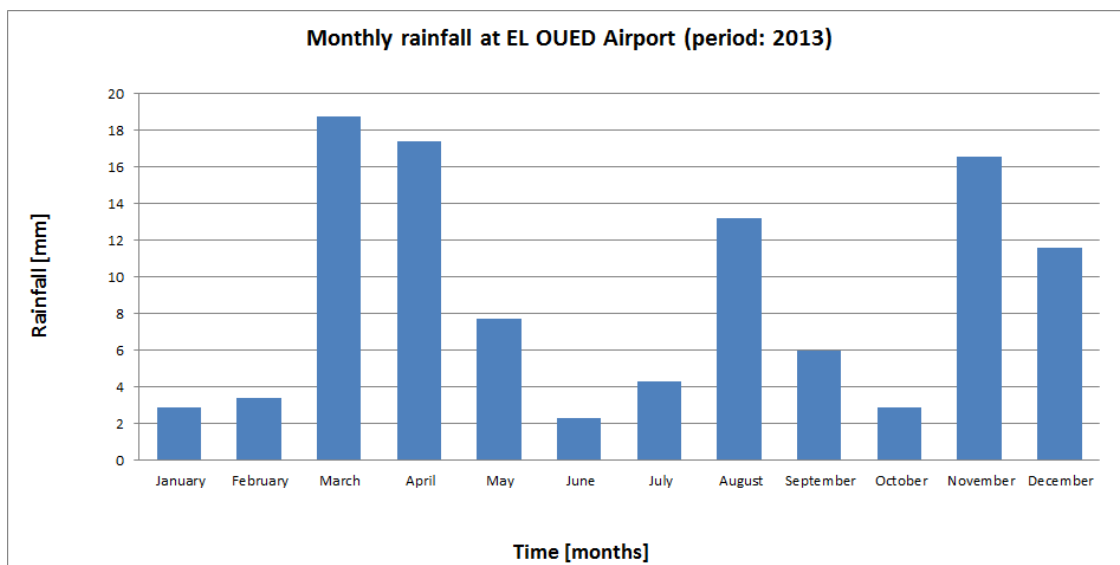


Figure 20. Pluviométrie mensuelle à El Oued (période: année 2013)

Les effets négatifs de ce phénomène sur le bilan hydrique du sol ont été confirmés par la réponse ponctuelle du modèle à la teneur en eau du sol qui a chuté plusieurs fois en dessous

du seuil défini pour l'épuisement de la zone racinaire. Par conséquent, pendant cette période, le manque d'eau a été compensé par de fréquents événements d'irrigation.

Le bilan hydrique cumulé, y compris les flux d'eau entrants et sortants les plus importants pour la saison agricole 2013, est décrit dans la figure 21. Les besoins en eau cumulés des cultures en millimètres par saison de culture sont la quantité d'eau nécessaire à la culture pour faire face à la perte d'eau due à évapotranspiration. En d'autres termes, il s'agit de la quantité optimale d'eau nécessaire à la culture pendant toute la saison de culture. La perte d'eau doit être compensée par la somme des précipitations et de l'irrigation comme le montre la figure 21.

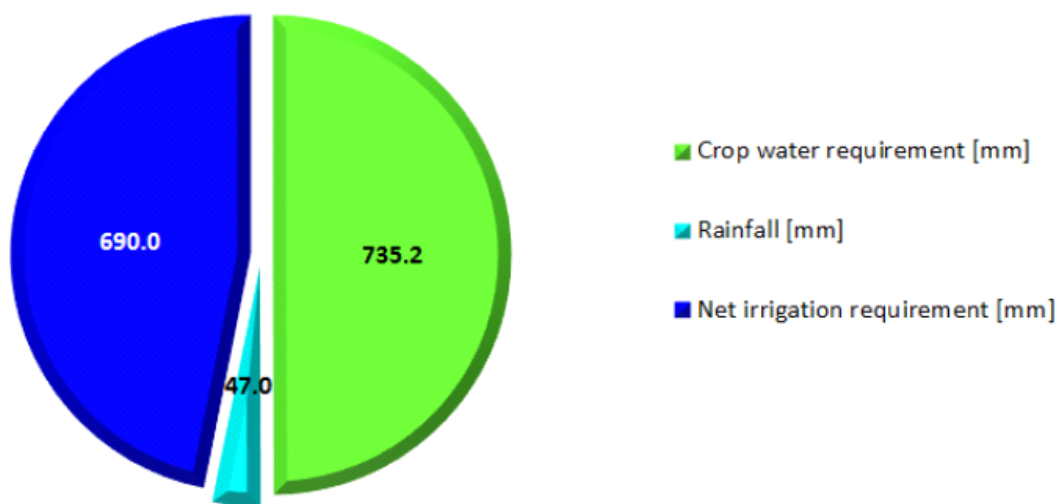


Figure 21. Besoin en eau d'irrigation et précipitations cumulées par rapport aux besoins en eau des cultures

2.2. Évaluation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures pour une saison de culture caractérisée par une pénurie de précipitations (année sèche)

L'analyse de la distribution annuelle des précipitations de la période 1997-2013 a été observée que l'année 2001 était caractérisée par les précipitations annuelles les plus faibles (58,4 mm), ce qui est une valeur très inférieure à la valeur annuelle moyenne des précipitations (111,17 mm) de l'ensemble de données de séries chronologiques. Ainsi, cette année de sécheresse a été choisie pour simuler la réponse du système sol-plante à un tel événement climatique extrême. Pour cette simulation de scénario, le jeu de données climatiques (précipitations, température de l'air et ETo) de l'année 2001 a été utilisé, tandis que tous les autres paramètres d'entrée déjà calibrés pour la simulation précédente (scénario réel) sont restés inchangés. La période de récolte qui en a résulté a été la suivante: 01.02.2001-01.06.2001. En opérant de cette manière, il a été possible de comparer directement les résultats des différents scénarios.

Les résultats quotidiens simulés du scénario caractérisé par une pénurie de précipitations sont présentés à la figure 22.

Pour avoir une vision claire de la distribution temporelle des précipitations extrêmement faibles de l'année 2001, les valeurs mensuelles des précipitations sont présentées à la Fig23.

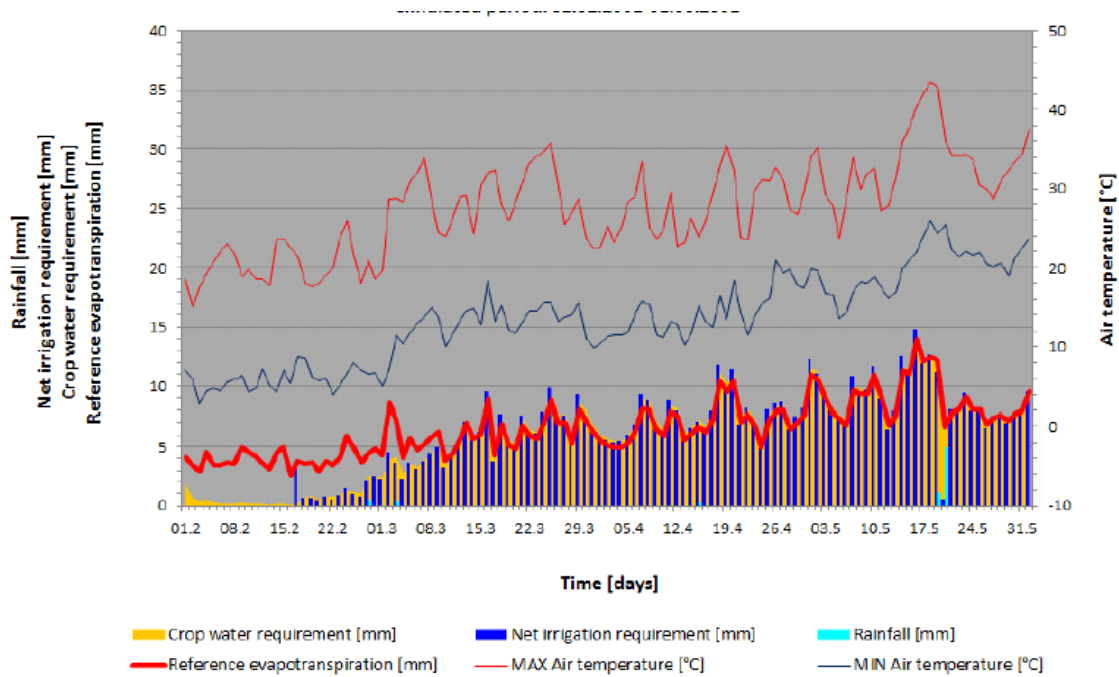


Figure 22. Évaluation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures pour une saison de culture caractérisée par une pénurie de précipitations

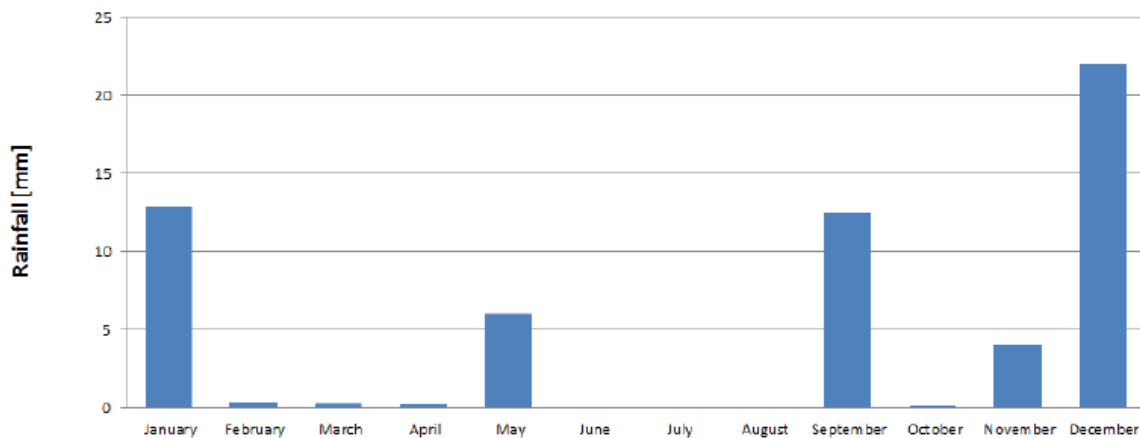


Figure 23. Pluviométrie mensuelle à El Oued (période: année 2001)

Les valeurs cumulées de l'irrigation nette et des précipitations par rapport aux besoins en eau des cultures à la fin de la période simulée sont présentées à la figure 24. En analysant les résultats cumulatifs des différentes composantes du bilan hydrique, on peut observer les besoins d'irrigation plus élevés attendus. Si l'on compare ce résultat avec l'irrigation nette

requis pendant le «scénario réel» (saison agricole 2013), 19 mm supplémentaires d'eau d'irrigation étaient nécessaires pour répondre aux besoins en eau des cultures de la saison agricole 2001.

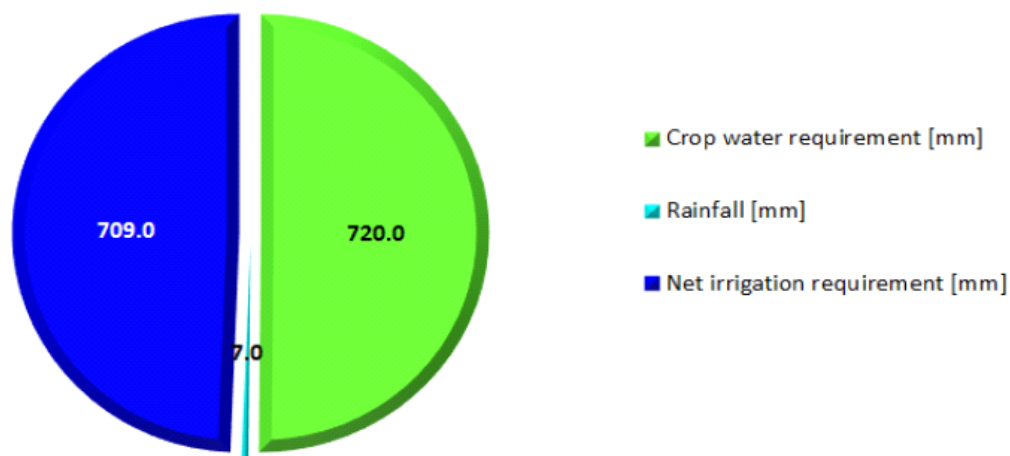


Figure 24. Irrigation nette et précipitations cumulées par rapport aux besoins en eau de la pomme de terre

2.3. Évaluation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures pour une saison de culture caractérisée par une augmentation de la température de l'air MAX et MIN

Dans cette simulation de scénario, les valeurs journalières maximales et minimales de température de l'air ont été augmentées de 2 ° C. Par conséquent, le fichier climatique AquaCrop a été adapté en incluant les valeurs de température de l'air augmentées et par conséquent un nouveau fichier ETo a été calculé, tandis que tous les autres paramètres d'entrée déjà calibrés pour le «scénario réel» sont restés inchangés. Pour la nouvelle simulation de scénario, la campagne agricole 2013 a de nouveau été prise comme période de culture de référence. Ainsi, la période de simulation résultante était la suivante: 01.02.2013-01.06.2013. Dans la figure 25, les besoins quotidiens en eau pour les cultures de pommes de terre et les besoins nets d'irrigation qui en résultent pour la période de croissance du 01.02.2013 au 01.06.2013 sont indiqués.

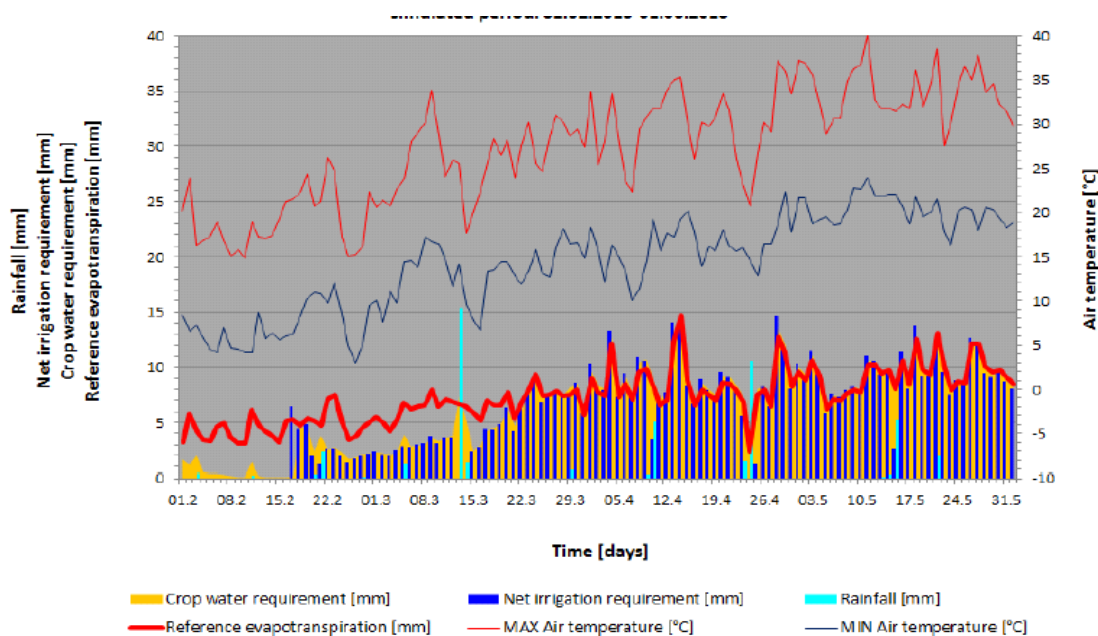


Figure 25. Évaluation des besoins nets en eau d'irrigation et des cultures pour une saison de culture caractérisée par une température quotidienne de l'air de 2 ° C plus élevée.

Les valeurs cumulées de l'irrigation nette et des précipitations par rapport aux besoins en eau des cultures à la fin de la période simulée sont indiquées à la figure 26. Si l'on compare les besoins nets cumulatifs d'irrigation entre le «scénario réel» (c'est-à-dire le scénario sans augmentation de la température de l'air) et ce simulation de scénario, environ 31 mm d'eau d'irrigation supplémentaire ont été nécessaires pour répondre aux besoins en eau des cultures en cas d'augmentation de la température de l'air.

Ainsi, n'augmenter que la température de l'air de 2 ° C a montré un changement significatif des valeurs des composantes du bilan hydrique simulées par AquaCrop par rapport aux valeurs du «scénario réel».

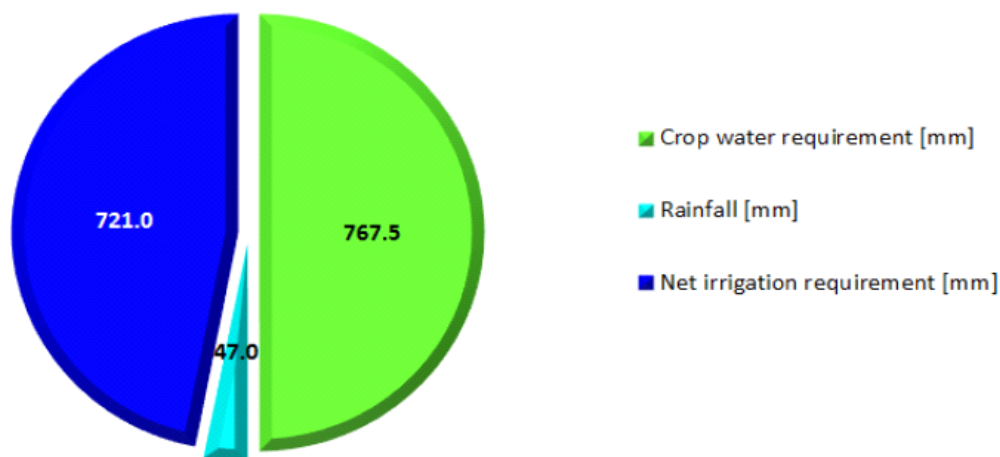


Figure 26. Irrigation et précipitations nettes cumulées par rapport aux besoins en eau de la culture de pomme de terre

Conclusion générale

Conclusion générale

L'utilisation efficace de l'eau pour la production agricole reste l'un des principaux défis à relever dans le monde. Ainsi, pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture, la gestion de l'irrigation doit être optimisée afin d'éviter le gaspillage inutile d'importantes ressources en eau, en particulier dans les pays où l'eau est un facteur limitant essentiel de la production agricole. Par conséquent, pour atteindre cet objectif, la quantité d'eau fournie pour l'irrigation pendant la saison de croissance ne doit pas dépasser les besoins en eau effectifs des cultures. Le besoin en eau des cultures est défini comme la quantité d'eau nécessaire pour compenser la perte par évapotranspiration du champ cultivé. Le besoin en eau d'une culture doit être satisfait pour atteindre les rendements potentiels.

En utilisant AquaCrop, qui est un modèle de productivité de l'eau des cultures développé par la Division des terres et des eaux de la FAO, les besoins nets en irrigation et les besoins en eau des cultures de pommes de terre à El Oued (Algérie) dans différentes conditions environnementales ont été simulés.

Dans le cadre de cette étude, quatre conditions environnementales différentes ont été simulées :

- Scénario actuel : saison de culture caractérisée par le jeu de données météorologiques le plus actuel et le plus complet (année : 2013) et, par conséquent, il peut être considéré comme le scénario de référence ;
- Scénario Nr.1 : saison de culture caractérisée par un manque de précipitations (année extrêmement sèche : année 2001) ;
- Scénario n° 2 : saison de culture caractérisée par une augmentation des températures MAX et MIN de l'air de 2 °C ;

Cette approche a permis de simuler différents scénarios environnementaux réels et potentiels liés au changement climatique.

En fonction des caractéristiques de la culture de la pomme de terre et de la variabilité des données climatiques, les périodes de simulation pour les quatre scénarios ont été sélectionnées comme suit :

- Scénario actuel : 01.02.2013-01.06.2013
- Scénario n° 1 : 01.02.2001-01.06.2001
- Scénario n°2 : 01.02.2013-01.06.2013

Conclusion générale

La comparaison des résultats des modèles a permis de comprendre dans quelle mesure chaque changement environnemental simulé affectait la demande en eau des cultures et, par conséquent, le rendement des cultures récoltables. Dans le cadre de cette étude, les facteurs limitant le développement des cultures et leurs besoins en eau étaient représentés à la fois par un manque de précipitations (scénario 1) et une augmentation de la température de l'air (scénario 2).

En ce qui concerne le degré de précision ainsi que la validité des résultats du modèle, un autre facteur important qui doit être pris en compte est que les simulations du modèle ont été calibrées en utilisant les données météorologiques d'une station située à l'aéroport local, donc la représentativité des résultats pour les champs cultivés situés trop loin de cet endroit peut être remise en question sans une nouvelle calibration valide du modèle.

Référence bibliographie

Référence bibliographique

Achour A., 1995. Diagnostic de l'état du patrimoine phoenicicole Algérien et essai d'analyse du cout de production dattier .Cas de la palmeraie du Souf. Mémoire d'ingénieur. Université d'Ouargla, 65p

Afra A, 2017. Transfert des eaux à partir des forages Albiens vers la station de traitement eaux d'Oued Souf. Mémoire master. Université Aboubekr Belkaid. Tlemcen. 131p

ANDI, 2014. Agence Nationale de Développement de L'investissement wilaya d'El oued 11P.

ANRH, 2009. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Direction Régionale SudOuargla. Rapports et compagne des mesures.

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 (*Hordeumvulgare*). Agric. Water Manage. 97 : 1838–1846.

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

Boote K.J., Jones J.W. and Pickering N.B. (1996). Potential uses and limitation of crop models. Agronomy Journal, 88 : 704-716.

Bonhomme R. (1997). Modélisation du fonctionnement d'une culture: caractérisation de la contrainte hydrique et prise en compte de ses effets., In INRA, ed. L'eau dans l'espace rural. Riou, C.,Bonhomme, R., Chassin, P., Neveu, A., Papy, F., Paris.

Boufares K., 2012 : Comportement de trois variétés de pommes de terre (Spunta, Désirée et Chubak) entre deux milieux de culture substrat et hydroponique, Thèse Magistère en Agronomie « Amélioration de la production végétale et biodiversité », Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.108 p

Chabah A ,2016. Contribution à l'étude de la production de quelques variétés de pomme de terre dans la région de Tlemcen. Mémoire master .université de Tlemcen.63p

Darpoux R., 1967: Les plantes sarclées Paris : maison rustiques, 399 p

Doorenbos J, Kassam Ah. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper n. 33. FAO, Rome, Italy 193pp.

Référence bibliographique

DPAT, 2016: Direction de Planification et d'Aménagement de Territoire de wilaya EL oued. Monographie de la wilaya EL oued.

DSA, 2018 : Données Statistiques et climatiques de la Wilaya d'El-Oued.

DSA, 2019. Données Statistiques sur la production de la culture pomme de terre.

ENAGEO, 1993. Entreprise nationale de géophysique. Rapports techniques.

FAO. 2014-Food and Agriculture Organization

FAO. 2016-Food and Agriculture Organization.

FAO. 2018 Food and Agriculture Organization.

Geerts S, Raes D, Gracia M, Miranda R, Cusicanqui JA, Taboada C, Mendoza J, Huancar, Mamani A, Condori O, Mamani J, Morales B, Osco V, Steduto P. 2009. Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy journal* 101, 499-508.

Andarzian B, Bannayan M, Steduto P, Mazraeh H, Barati ME, Barati MA, Rahnama A. 2011. Validation and testing of the Aquacrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management* **100**, 1-8.

Hawkes J G, 1990. The potato, Evolution, Biodiversity and genetic resources .London. Belhaven Press. 259p.

Kechid M., 2005. Physiologie et Biotechnologie de la Micro tubérisation de la Pomme de Terre *Solanum tuberosum*. L. Thèse Magister en Biotechnologie végétale, Université Mentouri, Constantine.

Lahouel Z, 2015. Etude diagnostique de la filière pomme de terre dans la région de Tlemcen. Cas de deux fermes pilotes : Hamadouche et Belaidouni. Mémoire master. Université Aboubekr Belkaid. Tlemcen. 95p

McCown R.L., Hammer G.L., Hargeaves J.N.G., Holzworth D.P. and Freebairn, D.M. (1995). APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural research. *Agric. Syst.*, 50 : 255–271.

Meissa B, 2016. L'eau et l'espace agraire dans l'Oued Souf : cas de l'ancienne palmeraie. Mémoire magister. Université d'Ouargla. 113P

Référence bibliographique

Moëne M, 2008. Structuration d'une filière pomme de terre en Afrique sahélienne. Projet de recherche ENSAIA (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires). Nancy, 30p.

Monteith J.L., (1996). The Quest for Balance in Crop Modeling. *Agronomy Journal*, 88 : 695 - 697.

Moule C., 1972. Plantes sarclées et déverses. J-B. Ballière et Fils, Editeur, Paris. 246 p.

Najah A, 1971. Le Souf des oasis. Edit la maison du livre. Alger. 1971. 174p

O.N.M, 2015: Office nationale de météorologie de la région du Souf.

Ozenda P., 1983. Flore du Sahara. Ed. Centre National des Recherches Scientifiques, Paris. 39 p.

Passioura J.B. (1996). Simulation Models : Science, Snake Oil, Education or Engineering? *Agronomy Journal*, 88 : 690 - 694.

Poitrineau A. (2001). Les Solanacées. In UNIVERSALLIS 6.

Raes D., Steduto P., Hsiao T.C. and Fereres E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3): 438-447.

Rousselle P, Robert Y, Grossuer J.C, 1996. La pomme de terre production, Amélioration, Ennemis et Maladies. Utilisation édition R Doun, 278 p.

Saulescu N.N. and Kronstad W.E. (1995). Growth Simulation Output for Detection of Differential Response to Environmental Factors. *Crop Science* 35 : 773-778.

Soltner D., 1979: Les grandes productions végétales phytotechnie spéciale.

Shorter R., Lawn R.J. and Hammer G.L. (1991). Improving genotypic adaptation in crops - A role for breeders, physiologist and modellers. *Experimental Agriculture*, 27 : 155-175.

Steduto P., Hsiao T.C., Raes D. and Fereres E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3): 426-437.

Stöckle C.O., Nelson R.L., (1999). CropSyst User's Manual. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA, USA.

Référence bibliographique

Stöckle C.O., Donatelli M. and Nelson R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. Eur. J. Agron. 18 (3–4), 289–307. Second special issue “Proceedings of the 2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems, Florence, Italy”.

Tahraoui, 2014. Potabilité et aptitude à l'irrigation des eaux des nappes profondes cas du CT et CI de la vallée d'EL Oued, mémoire master en hydraulique, université d'EL Oued.

TRIA M, 2009. Analyse de la compétitivité de la filière pomme de terre en Algérie. Thèse de magistère. ENSA (El-Harrach), Alger. 144P

TRIA S, 2011. Influence des fréquences d'arrosage sur le comportement de la pomme de terre dans la région du Souf. . Mémoire d'ingénierie. Université d'Ouargla. 78p

Uehara G. and Tsuji G.Y. (1993). The IBSNAT project. In: Penning de Vries, F.W.T., Teng, P., Metselaar, K. (Eds.), Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp. 505–513.

Voisin R, 2004. Le Souf monographie, Edit El Walid. 319p.

Whisler F.D., Acock B., Baker D.N., Fye R.E., Hodges H.F., Lambert J.R., Lemmon H.E., Mckinion J.M. and Reddy V.R. (1986). Crop simulation models in agronomic systems. Advances in Agronomy, 40 : 141 - 208.

Zine S, 2009. Etude de l'effet du paillage plastique noir sur la culture de la pomme de terre *Solanum tuberosum* L., var. Spunta conduite sous système d'irrigation goutte à goutte dans la région d'Oued-Souf. Mémoire ingénieur. Université d'Ouargla. 76p.