

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للعلوم الفلاحية

-الحراش-

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie

El Harrach –Alger-

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat-LMD

Option : Eau, Sol et Agroéquipements

Thème

**MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION SOUS
DIFFERENTS NIVEAUX DE FERTILISATION EN
UTILISANT LA TECHNIQUE ISOTOPIQUE**

Présenté par : AMIROUCHE Mawhoub

Devant le jury :

Président : KACI Ferhat (Professeur – ENSA El Harrach)

Directeur de thèse : ZELLA Lakhdar (Professeur – Université Saad Dahleb -Blida)

Co-directeur de thèse : MOUHOUCHE Brahim (Professeur – ENSA- El Harrach)

Examineurs :

REMINE Boualem (Professeur- Université Saad Dahleb -Blida)

LATATI Mourad (Maitre de conférences « A », ENSA- El Harrach)

Année universitaire : 2019/2020

Résumé

En Algérie, les cultures maraichères sont tributaires de l'irrigation. Dans ce contexte, la présente étude est orientée vers la gestion efficiente de l'eau en combinaison avec la fertilisation azotée qui contribue à la croissance et l'amélioration des rendements. La démarche repose, d'une part, sur la recherche de doses d'engrais azotés optimum, au cours du cycle végétatif qui contribueraient à réaliser des référentiels techniques pour une utilisation efficiente et, d'autre part, de quantifier séparément l'évaporation et la transpiration dont l'objectif est de maîtriser l'efficience des apports d'eau en relation avec les besoins en eau des cultures. Cette efficience d'utilisation, est impérative pour une meilleure production végétale et pour la préservation de l'environnement agricole.

Cette recherche est mise en valeur, à travers une expérimentation réalisée sur trois années consécutives 2014-2017, dans la région d'Alger à caractère subhumide.

La méthodologie adoptée porte sur la variation des doses optimales d'azote et leurs effets sur l'évolution de la culture de laitue (*Lactuca sativa* L.) dont l'impact socio-économique, est avéré, en s'appuyant sur la technique de marquage isotopique (^{15}N), le bilan de masse isotopique (^{18}O) et le modèle AquaCrop. Le dispositif expérimental adopté est de type bloc aléatoire complet, à quatre (04) niveaux : 0 (témoin), 60, 120 et 180 kg N/ha avec quatre (04) répétitions. Ces niveaux permettent de diagnostiquer l'effet des différentes doses sur la biomasse (matière sèche) et le rendement. Les résultats obtenus ont montré que les doses comprises entre 0 à 120 kg N/ha, augmentent significativement ($p < 0,05$) les rendements et la matière sèche dont les valeurs sont, respectivement, de 18,32; 45,49 à 57,93 t/ha et 4,32 ; 5,52 à 9,77 t/ha. La dose de 120 kg N/ha, est montrée statistiquement, comme la dose efficiente pour couvrir les besoins en azote de la laitue. Cette efficience atteint 74,48 %. Au-delà, l'azote est non valorisé par la culture. La précision du modèle dans l'étalonnage a été testée en utilisant les indicateurs statistiques suivant : R^2 , nRMSE et d, qui sont, respectivement, de $0,64 < R^2 > 0,81$; $18 < \text{nRMSE} > 46,3$ et $0,78 < d > 0,94$ pour la couverture de la canopée et $0,92 < R^2 > 0,98$; $21,6 < \text{nRMSE} > 34,5$ et $0,91 < d > 0,96$ pour la biomasse sèche. Les valeurs R^2 , nRMSE et d en 2016-2017 (année de validation) ont été obtenues comme suit : $0,81 < R^2 > 0,98$; $5,9 < \text{nRMSE} > 25,7$ et $0,93 < d > 1$ pour la couverture de la canopée et $0,94 < R^2 > 0,98$; $14,8 < \text{nRMSE} > 24,7$ et $0,97 < d > 0,99$ pour la biomasse sèche, respectivement.

La contribution de la transpiration à l'évapotranspiration réelle est, respectivement, de 81,00 et 79,93 %, pour le bilan de masse isotopique et le modèle Aquacrop. Une bonne corrélation ($r = 0,76$) a été obtenue entre l'ETR mesurée par le bilan de masse isotopique et celle simulée par le modèle AquaCrop.

Sur la base du rendement et de la biomasse sèche, le traitement T3 (120 kg N/ha) a donné un bon rendement par rapport aux d'autres traitements. Ce qui a été démontré à la fois par les résultats expérimentaux et les simulations du modèle. Ces résultats montrent que le modèle AquaCrop, pourrait être recommandé comme un outil pratique pour mieux gérer les pratiques agricoles notamment, la fertigation.

Mots clés

Algérie, Efficience d'Utilisation d'Azote, Technique isotopique, Laitue, Dose efficiente, Productivité de l'eau

Abstract

In Algeria, market gardening depends on irrigation. In this context, the present study focuses on efficient water management in combination with nitrogen fertilization which contributes to growth and yield improvement. The approach is based, on the one hand, on the search for optimum doses of nitrogenous fertilizers during the vegetative cycle, which would contribute to the development of technical reference systems for efficient use and, on the other hand, to separately quantify evaporation and transpiration, the aim of which is to control the efficiency of water supply in relation to crop water requirements. This efficiency of use is imperative for a better crop production and for the preservation of the agricultural environment. This research is highlighted, through an experiment carried out over three consecutive years 2014-2017, in the region of Algiers with sub-humid character. The methodology adopted focuses on the variation of optimal nitrogen doses and their effects on the evolution of lettuce cultivation (*Lactuca sativa* L.), which has a socio-economic impact. The approach takes into account the isotopic marking technique (^{15}N), the isotope mass balance (^{18}O) and the AquaCrop model. The experimental device adopted is of the randomized complete block design (RCBD), with four (04) levels: 0 (control), 60, 120 and 180 kg N/ha with four (04) repetitions. These levels are used to diagnose the effect of different doses on biomass (dry matter) and yield. It has been shown those doses between 0 and 120 kg N/ha increase significantly ($p < 0.05$), yields and dry matter with values of 18.32; 45.49 to 57.93 t ha⁻¹ and 4.32; 5.52 to 9.77 t/ha, respectively. The rate of 120 kg N/ha, is shown statistically, as the efficient rate to cover the nitrogen needs of lettuce. This efficiency reaches 74.48%. Beyond that, nitrogen is not valorized by the crop. These results contribute to the realization of a technical reference system for lettuce cultivation, for an efficient use of nitrogen.

The accuracy of the model in calibration was tested using R^2 , nRMSE and d, which were $0.64 < R^2 > 0.81$; $18 < \text{nRMSE} > 46.3$ and $0.78 < d > 0.94$ for canopy cover and $0.92 < R^2 > 0.98$; $21.6 < \text{nRMSE} > 34.5$ and $0.91 < d > 0.96$ for dry biomass, respectively. The R^2 , nRMSE and d values in 2016-2017 (validation year) were obtained as $0.81 < R^2 > 0.98$; $5.9 < \text{nRMSE} > 25.7$ and $0.93 < d > 1$ for canopy cover and $0.94 < R^2 > 0.98$; $14.8 < \text{nRMSE} > 24.7$ and $0.97 < d > 0.99$ for dry biomass, respectively. The contribution of transpiration to actual evapotranspiration is 81.00% and 79.93%, for the isotope mass balance (IMB) and the Aquacrop model, respectively. A good correlation ($r = 0.76$) was obtained between the actual evapotranspiration measured by IMB and that simulated by the AquaCrop model. On the basis of yield and dry biomass, the T3 treatment (120 kg N/ha) gave a good yield compared to other treatments. This was demonstrated by both experimental results and model simulations. These results show that the AquaCrop model could be recommended as a practical tool to better manage agricultural practices such as fertigation.

Keywords

Algeria, Nitrogen Use Efficiency, Isotope Approach, Lettuce, Efficient Dose, Water Productivity

ملخص:

في الجزائر، تعتمد زراعة الخضروات على الري. في هذا السياق، قمنا في هذه الدراسة على الإدارة الفعالة للتسيير الحسن للمياه بالاقتران مع تسميد النيتروجين مما يساهم في النمو وتحسين الغلة. اعتمدت المنهجية، من جهة، على البحث عن الجرعات المثلى من الأسمدة النيتروجينية خلال دورة الزرع، والتي من شأنها، تساهم في تطوير أنظمة مرجعية تقنية للاستخدام الفعال، ومن ناحية أخرى، لتقدير التبخر والنتج بشكل منفصل والهدف منه هو التحكم في كفاءة إمدادات المياه فيما يتعلق بمتطلبات النبتة للمياه. وهذه الكفاءة من أجل الإنتاج الأفضل للمحاصيل وللحفاظ على البيئة الزراعية. تم تسليط الضوء على هذا البحث، من خلال تجربة أجريت على مدى ثلاث سنوات متتالية 2014-2017، في منطقة الجزائر العاصمة ذات مناخ شبه رطب.

تتعلق المنهجية المتبعة باختلاف الجرعات المثلى من النيتروجين وتأثيراتها على تطور الخس (*Lactuca sativa* L) التي ثبت تأثيرها على الاقتصاد والمجتمع وذلك بالاعتماد على تقنية النظائر (^{18}O , N^{15}) ونموذج AquaCrop. البروتوكول التجريبي المعتمد هو randomized complete block design (RCBD) على أربعة (04) مستويات: 0 (شاهد)، 60، 120 و 180 كغ/هكتار مع أربعة (04) تكرارات. استخدمنا هذه المستويات لتشخيص تأثير الجرعات المختلفة على الكتلة الحيوية (المادة الجافة) والمردود. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الجرعات التي تتراوح من 0 إلى 120 كغ/هكتار تزيد بشكل كبير ($p < 0.05$) من المردود والمادة الجافة، وقيمها على التوالي 18.32؛ 45.49 إلى 57.93 طن / هكتار و 4.32 و 5.52 إلى 9.77 طن / هكتار. بين التحليل الإحصائي أن الجرعة 120 كغ/هكتار هي الجرعة الفعالة لتغطية متطلبات النيتروجين للخس. هذه الكفاءة تصل إلى 74.48٪. بعد هذه الجرعة، لا يتم تقدير النيتروجين بالمحصول.

تم اختبار دقة النموذج في المعايرة باستخدام R^2 ، nRMSE و d، والتي كانت $0.81 < R^2 > 0.64$ ؛ $46.3 > nRMSE$ و $0.94 < d > 0.78$ كثافة الغطاء النباتي و $0.92 < R^2 > 0.92$ و $34.5 < nRMSE > 21.6$ و $0.96 < R^2 > 0.91$ للكتلة الحيوية الجافة، على التوالي. تم الحصول على قيم R^2 و nRMSE و d في 2016-2017 (سنة التحقق) $0.98 < R^2 > 0.81$ ؛ $25.7 < nRMSE > 5.9$ و $1 < d > 0.93$ كثافة الغطاء النباتي و $0.98 < R^2 > 0.94$ ؛ $24.7 < nRMSE > 14.8$ و $0.99 < d > 0.97$ للكتلة الحيوية الجافة، على التوالي. مساهمة النتج في التبخر الفعلي هي 81.00 و 79.93٪، على التوالي، لتقنية النظائر ونموذج AquaCrop. تم الحصول على علاقة جيدة ($r = 0.76$) بين تقنية النظائر (O^{18}) والتي تمت محاكاتها بواسطة نموذج AquaCrop. على أساس المحصول والكتلة الحيوية الجافة، أعطت الجرعة 120 كغ/هكتار غلة جيدة مقارنة بالجرعات الأخرى. وقد تجلى ذلك من خلال كل من النتائج التجريبية والمحاكاة بالنموذج AquaCrop. بينت هذه النتائج أنه يمكن التوصية بنموذج AquaCrop كأداة عملية لإدارة الممارسات الزراعية بشكل أفضل مثل السقي والتسميد.

الكلمات المفتاحية:

الجزائر، كفاءة استخدام النيتروجين، تقنية النظائر، الخس، الجرعة الفعالة، إنتاجية المياه

Remerciements

Au terme de mes recherches, fruit de mes années de labeur, je remercie Dieu, de m'avoir donné du courage d'aboutir ces recherches et d'avoir mis sur mon chemin, les personnes et les moyens, qui m'ont aidé dans son élaboration.

*Je tiens à remercier chaleureusement, Mon Directeur de thèse **M. ZELLA L.** professeur au département d'Agronomie à l'Université de Saad Dahleb de Blida (USDB), qui m'a témoigné son soutien et sa confiance. Il m'a prodigué un enseignement toujours judicieux durant toutes les phases de recherches, qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.*

*J'adresse de chaleureux remerciements à mon Co-Directeur de thèse, **M. MOUHOUCHE B.** Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite, de cette thèse.*

*Mes vifs remerciements vont aussi, à **M.KACI F.** Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.*

*Mes remerciements s'adressent aussi aux examinateurs, Monsieur **REMINI B.** Professeur à l'Université de Saad Dahleb de Blida (USDB) et Monsieur **LATATI M.** Maître de conférences à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, qui ont accepté d'accorder du temps à la lecture et à l'examen de ce travail de recherche.*

*Cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet de recherche de l'INRAA, en collaboration avec l'AIEA (RAF 5/ 071). C'est dans ce contexte, que je tiens à remercier Monsieur **SEMIANI M.** Chef de projet, qui a accepté de m'impliquer dans la thématique portant sur « amélioration l'efficience d'utilisation de l'eau et des engrais », où j'ai réalisé mes premiers pas dans le domaine de la recherche. Je remercie vivement le **Docteur SMADHI D.,** Directrice de la Division de Bioclimatologie et Hydraulique Agricole (DBHA) pour son soutien et sa disponibilité. Grâce à sa collaboration, j'ai eu la chance d'acquérir de nouvelles compétences et d'apporter par mes travaux, une contribution aux résultats de recherches. Je n'oublie pas, de remercier tous les membres participant au projet, et toute l'équipe de la DBHA, pour l'ambiance conviviale qui, y règne.*

Je tiens à exprimer toute m'a gratitude à ma famille, qui a veillé à mon confort et m'a encouragé et soutenu le long de mes années de travaux. Qu'elle trouve le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Enfin, je remercie toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, que ce soit par son amitié, ses conseils ou son soutien moral.

Sommaire

Résumé	I
Remerciements	IV
Liste des tableaux	X
Liste des figures	XI
Liste des abréviations	XIII
INTRODUCTION GENERALE	1
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	4
CHAPITRE 1. L'EVAPOTRANSPIRATION : CONCEPT ET METHODES D'APPROCHE	
1. Concept et définitions.....	4
1.1. Concept	4
1.2. Définitions	5
1.2.1. L'évapotranspiration (ET).....	5
1.2.2. Evapotranspiration potentielle (ETP).....	6
1.2.3. Evapotranspiration réelle (ETR).....	6
1.2.4. Evapotranspiration maximale (ETM).....	6
2. Méthodes de mesures et d'estimations de l'évapotranspiration.....	7
2.1. Les facteurs conditionnels de la mesure de l'évapotranspiration.....	7
2.2. Les outils de mesures de l'évapotranspiration	7
3. Processus de transfert d'eau dans le continuum « Sol - Plante - Atmosphère ».....	8
3.1. Processus de transfert d'eau dans le continuum « Sol-Atmosphère ».....	9
3.2. Processus de transfert d'eau dans le continuum « Plante-Atmosphère ».....	9
4. Partition de l'évapotranspiration	9
5. Les outils de mesures du partitionnement de l'ET	10
5.1. Modèles de partitionnement de l'évapotranspiration.....	10
5.2. Les isotopes stables de l'eau ($\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$).....	10

5.2.1. Définition, terminologie et normes.....	10
5.2.2. Application des isotopes stables $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ à l'estimation le taux d'évapotranspiration..	11

CHAPITRE 2. LA FERTILISATION AZOTEE

1. Consommation d'engrais dans le monde.....	13
2. Consommation d'engrais par hectare de terre arable.....	13
3. Utilisation des engrais azotés en Algérie	14
4. La fertilisation en Algérie.....	15
5. Efficience d'utilisation d'azote (EUN).....	16
6. Méthode d'évaluation l'EUN.....	17
6.1. Méthode classique basée sur le rendement.....	17
6.2. Méthode basée sur l'absorption de nutriment.....	17
6.2.1. Méthode du bilan azoté.....	17
6.2.2. Méthode isotopique	17

CHAPITRE 3. LE MODELE AQUACROP

1. Les modèles de culture	18
1.1. Définitions.....	18
1.2. Développement des modèles de culture.....	18
2. L'approche Ky au modèle AquaCrop.....	20
3. Composantes du modèle AquaCrop.....	21
4. Evaluation la performance du modèle Aquacrop.....	23
4.1. Coefficient de détermination (R^2) de l'ajustement linéaire.....	23
4.2. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (nRMSE).....	24
4.3. Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).....	24
4.4. Le modèle du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (EF).....	24
4.5. L'indice d'accord de Willmott (d)	25

CHAPITRE 4. CULTURE DE LAITUE

1. Origine et histoire de la laitue.....	26
2. Caractéristique de la laitue.....	26
2.1. La plante.....	26
2.2. La semence.....	26
2.3. Stades phénologiques de la laitue.....	27
2.4. Exigences de la laitue.....	28
3. Types de variétés de laitue.....	28
4. Bienfaits de laitue	28
5. Place de laitue dans le monde.....	29
Quantités	29
Recettes	29
Prix de la laitue.....	30

MATERIEL ET METHODES

1. Site de l'expérimentation.....	31
2. Caractéristiques climatiques de la Zone d'étude.....	31
3. Caractéristiques physico-chimique de la zone d'étude.....	31
4. Protocole expérimental.....	31
5. Paramètres mesurés.....	32
5.1. Profil hydrique	32
5.2. Biomasse (B).....	32
5.3. Couverture de la canopée (CC).....	33
5.4. Rendement.....	33
6. Approches isotopiques	33
6.1. Evaluation l'efficacité d'utilisation d'azote via le N ¹⁵	33
6.2. Evaluation l'efficacité d'utilisation de l'eau via l'oxygène ¹⁸ O.....	34

6.2.1. Prélèvements au champ	34
6.2.2. L'échantillonnage.....	35
6.2.2.1. Sol.....	35
6.2.2.2. Végétaux.....	35
6.2.2.3. Les apports d'eau.....	36
6.3. Extraction de l'eau.....	36
6.3.1. Vérification et enregistrement des échantillons.....	36
6.3.2. Système de distillation sous vide	36
6.3.2.1. L'assemblage de verre et d'échantillons.....	37
6.3.2.2. Système d'évacuation.....	38
6.3.2.3. Système d'extraction de l'eau	38
6.3.3. La procédure à suivre pour l'extraction de l'eau du sol et des plantes	39
6.4. Méthode du bilan massique isotopique (Isotope Mass Balance).....	39
7. Evaluation les données par le modèle AquaCrop.....	41
8. Calibration du modèle pour le stress de fertilité du sol.....	41
 RESULTATS ET DISCUSSIONS	
1. Analyse des données climatiques.....	43
2. Caractéristiques physico-chimiques du sol.....	44
3. Effet de la fertilisation sur la biomasse aérienne et le rendement.....	44
4. Effet de la fertilisation azotée sur la teneur en azote (N %)......	46
5. Valorisation de l'azote par la plante.....	47
6. Efficience d'utilisation d'azote (EUN).....	48
7. Calibrage et validation du modèle AquaCrop.....	49
7.1. Bilan hydrique.....	49
7.2. Résultat de calibration du modèle.....	49
7.3. Résultats de validation du modèle.....	52

7.4. Rendements.....	53
7.5. Productivité de l'eau (WP).....	54
8. Analyse isotopique	56
8.1. Signature isotopique de l'eau du sol, de pluie et de la tige	56
8.2. Bilan hydrique et les profils isotopiques.....	57
8.3. Estimation de l'évaporation et de la transpiration par la méthode isotopique (IMB).....	60
8.4. L'évapotranspiration estimée par le modèle AquaCrop et IMB.....	62
CONCLUSION GENERALE.....	65
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	66

Liste des tableaux

Tableau 1. Les paramètres et les facteurs conditionnant la mesure l'ET.....	7
Tableau 2. Classification des méthodes de mesure-estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle.....	8
Tableau 3. La consommation d'engrais dans quelques pays du monde en 2016 (B.M., 2019).....	14
Tableau 4. Paramètres de culture d'entrée pour calibrer le modèle Aquacrop.....	41
Tableau 5. Données d'entrées pour calibrer le modèle Aquacrop au stress de fertilité du sol.....	42
Tableau 6. Propriétés physico-chimiques du sol	44
Tableau 7. Résultats de calibration et de validation de la biomasse, le rendement et la Couverture de la canopée maximale sous différents niveaux de fertilisation en 2015-2016 et 2016-2017.....	50
Tableau 8. Indicateurs de la qualité de l'ajustement dans l'estimation de la couverture du couvert et de la biomasse pour l'étalonnage du modèle en 2015-2016 et la validation en 2016-2017.....	52
Tableau 9. L'effet de stress de fertilité du sol sur la productivité de l'eau et sur le développement de la couverture de la canopée.....	55
Tableau 10. Résultats de calcul l'évaporation et la transpiration par la méthode isotopique (IMB).....	61

Liste des figures

Figure 1. Évaporation et évapotranspiration (Source : Projet SUDMED 2007).....	5
Figure 2. Schéma théorique de la variabilité annuelle de l'ET0, ETM et ETR (Source : Chahbouni, 2009).....	5
Figure 3. La consommation mondiale d'engrais de 2002-2016 (Banque Mondiale, 2019).....	14
Figure 4. L'évolution de la consommation d'engrais azoté.....	15
Figure 5. Schéma d'AquaCrop présentant les composants principaux du continuum sol-plante- atmosphère et les paramètres caractérisant la phénologie, la couverture de la canopée, la transpiration, la production de biomasse et le rendement final.....	22
Figure 6. Stades phénologiques de la laitue (<i>Lactuca sativa</i>).....	27
Figure 7. Les producteurs de laitue dans le monde (FAOSTAT, 2017).....	30
Figure 8. Localisation de la zone d'étude.....	31
Figure 9. Dispositif expérimental.....	32
Figure 10. Analyse la fraction de la canopée verte pour le stade de croissance.....	33
Figure 11. Prélèvement des échantillons à l'aide d'une tarière pédologique.....	35
Figure 12. Pluviomètre.....	36
Figure 13. Tube de piégeage avec tube de l'échantillon.....	37
Figure 14. Système d'évacuation	38
Figure 15. Système d'extraction de l'eau.....	38
Figure 16. Précipitations, évapotranspiration potentielle (ETP) à l'échelle mensuelle pour les années d'essais 2014/2015, 2015/2016 et 2016/2017.....	43
Figure 17. Variation des températures maximales, minimales et moyennes à l'échelle mensuelle pour les années d'essais 2014/2015, 2015/2016 et 2016/2017.....	44
Figure 18. Effet de différents niveaux de fertilisation sur l'évolution de la biomasse aérienne fraîche (a) et sèche (b) pour les trois saisons de croissance.....	45
Figure 19. Effet de différents niveaux de fertilisation sur le rendement pour les trois saisons de croissance [a, b et c représentent des différences significatives ($p < 0,05$)]....	46
Figure 20. Effet de différents niveaux de fertilisation sur le taux d'azote total (N %) au niveau des feuilles (c) et des racines (d) de la laitue.....	47
Figure 21. Source d'azote dans la partie aérienne (e) et système racinaire (f) de la laitue	48
Figure 22. Variation de l'efficacité d'utilisation l'azote par la laitue, exprimés en pourcentage (%).....	48

Figure 23. Teneurs en eau observées comparées aux teneurs en eau simulées pour les saisons de croissance (2015/2016) et (2016/2017).....	49
Figure 24. Couverture de la canopée (g) et la biomasse sèche (h) simulées et mesurées pour la période d'étalonnage (2015/2016) sous différents niveaux de fertilisation (T1, T2, T3 et T4).....	51
Figure 25. Couverture de la canopée (i) et la biomasse sèche (j) simulées et mesurées pour la période de validation (2016/2017) sous différents niveaux de fertilisation (T1, T2, T3 et T4).....	53
Figure 26. Rendements simulés et observés de la laitue sous différents niveaux de fertilisation.....	54
Figure 27. Variation de la productivité de l'eau de la laitue sous différents niveaux de fertilisation.....	54
Figure 28. Effet de la pluie sur les signatures isotopiques dans le système sol-plante : (k) après une pluie ; (l) avant une pluie.....	56
Figure 29. Les profils hydriques et isotopiques (^{18}O).....	59
Figure 30. La contribution de l'évaporation et de la transpiration estimée par le modèle Aquacrop et la méthode isotopique (IMB) durant toute la période d'observation (02/02 à 28/03/2017).....	62
Figure 31. Relation entre l'évapotranspiration mesurée (IMB) et simulé (Aquacrop).....	63

Liste des abréviations

AIEA : Agence Internationale de l'Energie d'Atome

B : Biomasse

BM : Banque Mondiale

C° : Degré Celsius

CC : Couverture de la Canopée

CCx : Couverture de la Canopée maximale

CDC : Coefficient de déclin de la Canopée

CGC : Coefficient de Croissance de la Canopée

cm : centimètre

CNESTEN : Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires

E : Evaporation

ENSA : Ecole Nationale Supérieure Agronomique (Ex : INA)

ET : Evapotranspiration

ETM : Evapotranspiration Maximale

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

EUE : Efficience d'Utilisation de l'Eau

EUN : Efficience d'Utilisation de l'Azote

FAO : Organisation Mondiale de l'Alimentation et de l'Agriculture

g : gramme

h : heure

ha : hectare

HI : Indice de Récolte

IMB : Isotope Mass Balance

INRAA : Institut National de la Recherche Agronomique

INSID : Institut National des Sols de l'Irrigation et du Drainage

ITCMI : Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles

JAT : Jour Après Transplantation

Kc : Coefficient cultural

Kg : Kilogramme

MADR : Ministère de l'Agriculture, du développement Rural

ml : millilitre

mm : millimètre

MRE : Ministère des Ressources en Eau

N : Azote

Ndff : L'azote dérivé par le fertilisant

Ndfs : L'azote provenant du sol

ONU : Organisation des Nations Unies

q : quintal

SAU : Surface Agricole Utile

SWC : Teneur en eau dans le sol

t : tonne

T : Transpiration

VSMOW : L'eau océanique moyenne normalisée de Vienne

WP* : Productivité de l'eau normalisée

Y : Rendement

Introduction générale

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

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

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

Par rapport à l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation, les études réalisées dans le cadre de la mise en œuvre de la stratégie méditerranéenne pour le développement durable ont classé l'Algérie parmi les pays ayant atteint un niveau d'efficacité de l'ordre de 48%. Ce niveau d'efficacité est prévu d'être amélioré pour atteindre 80% en 2025 (Benblidia, 2012).

En Algérie, le secteur agricole absorbe annuellement près de 70 % de l'ensemble des volumes d'eau consommés au niveau national. La consommation en eau dans ce secteur est d'environ 7 milliards de m³ en moyenne annuelle, sachant que la consommation globale nationale (consommation de la population en eau potable, les besoins des secteurs industriel et agricole) est de 10,6 milliards de m³/an (MRE, 2018).

S'agissant de productivité de l'eau, une analyse comprenant 93 pays (FAO, 2003) prévoit une augmentation de la production agricole à l'horizon 2030 de 49% et 81% dans, respectivement, les régions pluviales et irriguées. Même si en Algérie, la surface irriguée augmente légèrement ces dernières années.

Il est estimé que dans les régions semi-arides et arides, l'eau demeure une contrainte majeure pour l'amélioration de la production agricole. Aussi, la maximisation du rendement par unité d'eau (efficacité de l'eau de pluie et/ou irrigation) semble être la meilleure stratégie. En dépit de la rareté de l'eau, le constat fait sur la gestion de l'eau d'irrigation fait ressortir une insuffisance relative aux méthodes de gestion de l'eau simples et accessibles aux agriculteurs pour guider la programmation des irrigations. En effet, devant l'absence totale d'outils d'aide à la décision (outils de pilotage et bulletins d'avertissement à l'irrigation) maîtrisés par les agriculteurs, le déclenchement et les doses

d'irrigation sont, en général, décidés sur la base de l'observation visuelle. Cette méthode de gestion de l'eau engendre, souvent, des pertes en eau non négligeables. Donc afin de faire face à ce défi, bien mesurer ou bien estimer l'évapotranspiration permet d'approfondir les connaissances des besoins en eau des cultures et par conséquent de mieux optimiser les volumes d'irrigation. Il apparaît aussi important de connaître les parts respectives de l'évaporation et de la transpiration.

Sur le plan expérimental, plusieurs méthodes ont été développées pour déterminer la partition d'évapotranspiration dans le but de mieux gérer les ressources en eau et par conséquent, améliorer l'efficacité de l'irrigation. Il est donc utile d'avoir recours à d'autres méthodes d'estimation ou de mesure de l'évapotranspiration et de ses composantes de sorte à aborder sous un angle différent la problématique et apporter des informations complémentaires.

La gestion efficace de l'eau, ne se limite pas uniquement à maîtriser les fréquences et les doses d'irrigation mais nécessite, la maîtrise de l'ensemble des pratiques culturales associées à l'irrigation (fertilisation, choix variétal, traitements phytosanitaires...etc.)

En matière de fertilisation, le constat fait ressortir la nécessité de promouvoir une fertilisation adaptée et équilibrée. Selon l'INSID (2009), les engrais sont appliqués en l'absence de référentiels techniques, négligeant le contenu initial du sol et des eaux d'irrigation et par conséquent, les apports sont souvent mal fractionnés entraînant un gaspillage qui constitue une source de pollution des sols et des eaux. L'irrigation est, aussi, mise en cause pour sa contribution à la pollution. En cas d'apport excessif, une partie de cette eau peut percoler dans le sol en véhiculant les polluants.

La question d'une gestion appropriée de l'irrigation et de la fertilisation s'inscrit dans une problématique importante pour d'une part, préserver les ressources en eau, tant du point de vue quantitatif que qualitatif et d'autre part, améliorer la productivité de l'eau ainsi que les coûts de production. A ce titre, il a été utilisé dans cette étude l'approche isotopique, notamment l'azote N^{15} et l'oxygène O^{18} pour évaluer, respectivement, l'efficacité d'utilisation d'azote et de l'eau.

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

Dans cette recherche, Il a été utilisé le modèle AquaCrop développé par la division FAO/AIEA. Par rapport à d'autres modèles, AquaCrop est un modèle opérationnel, simple

et nécessite un nombre significativement plus réduit de paramètres, atteignant un équilibre entre simplicité, précision et robustesse (Aouade, 2012).

Partant de ces constats et acquis, les objectifs suivants ont été retenus pour cette étude :

- Rechercher les doses d'engrais azotés optimum dans le but de contribuer à produire des référentiels techniques pour une utilisation efficiente des fertilisants en utilisant l'azote isotopique (N^{15}) ;
- Adapter le modèle Aquacrop aux conditions locales, plus précisément, il s'agit de calibrer le modèle Aquacrop pour la culture de laitue, conduite sous différents niveaux de fertilisation.
- Evaluer la consommation en eau des cultures via l'estimation séparée de l'évaporation et de la transpiration en utilisant les isotopes stables de l'eau ($H_2^{18}O$ et $HD^{16}O$) ;
- Vérifier la fiabilité du modèle Aquacrop en comparant les outputs de ce modèle notamment l'évaporation, la transpiration et les rendements avec ceux mesurés via la technique isotopique.

Cette thèse est structurée en trois parties :

- La première partie abordera dans un premier temps la définition du concept de l'évapotranspiration sous ses différentes formes (ETP, ETM et ETR), les moyens et les techniques de la mesure et les facteurs conditionnels. Dans un second chapitre le modèle de cultures AquaCrop qui a été choisi comme outil principal de modélisation dans ce travail.
- La deuxième partie traitera la présentation du site d'étude (localisation, caractéristiques climatiques et pédologiques), et du matériel expérimental appliqué pour mesurer les paramètres climatiques in-situ, ainsi que 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 calibration et de validation du modèle Aquacrop. Aussi, il est consacré pour une comparaison des simulations obtenues par le modèle AquaCrop avec les données issues de l'isotopie et les données expérimentales, notamment l'évaporation du sol, et la transpiration de la plante, la fraction du couvert et le rendement.

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

Synthèse bibliographique

CHAPITRE 1. L'ÉVAPOTRANSPIRATION : CONCEPTS ET METHODES D'APPROCHE

La compréhension et la description de transfert de l'eau dans le système sol –plante-atmosphère ont beaucoup d'intérêt pour les chercheurs travaillant en hydrologie, en agronomie, en foresterie et en sciences de l'environnement, surtout dans les zones arides et semi-arides.

L'évapotranspiration (ET) est l'une des composantes du cycle hydrologique les plus difficiles à quantifier du fait de sa complexité dans le système sol-plante-atmosphère (Xu et Singh, 1998). Son estimation est importante pour les programmes d'irrigation, la planification et la gestion des ressources en eau (Xu et Singh, 1998; Adeboye *et al.*, 2009; Jia *et al.*, 2013 ; Heydari *et al.*, 2014; Djaman *et al.*, 2015).

Il apparaît que l'étude de l'utilisation de l'eau par les cultures, ne peut se faire qu'en intégrant simultanément les connaissances relatives au fonctionnement des trois types du maillon (le sol, la plante et l'atmosphère) dont les effets sur l'évapotranspiration sont naturellement très fortement interdépendants.

1. Concepts et définitions

1.1. Concepts

Il est crucial de préciser le concept de l'évapotranspiration. En effet, l'examen de la revue de la littérature sur l'évapotranspiration montre qu'il existe plusieurs aspects différents et parfois même des confusions entourant la notion d'évapotranspiration (Mjeira, 2015). Le concept de l'évapotranspiration a été introduit, comme un paramètre climatique, pour la première fois par le chercheur **Thornthwaite** en 1948, dans un contexte de classification du climat. Ce concept a été utilisé ultérieurement par les agronomes et les hydrologues comme un élément de base pour calculer l'évapotranspiration réelle (ETR). En revanche, **Penman** en 1956 (auteur d'une équation prédictive fondée sur des bases physiques théoriques) a réalisé une formule opérationnelle associant des aspects biophysiques et aérodynamiques pour déterminer la quantité maximale demandée par une plante, autrement dit, il a introduit le concept de l'évapotranspiration maximale (ETM). Par la suite, cette formule a été adoptée comme étant ETP de Penman, qu'il considère comme « *l'évaporation d'une pelouse rase suffisamment étendue, en bon état et convenablement alimentée en eau* ». Il est clair que ce concept, se base sur l'interaction sol- plante-atmosphère et pose beaucoup d'ambiguïté, en particulier au niveau des méthodes de mesures et de simulation.

1.2. Définitions

L'**évapotranspiration** (ET) est une combinaison de deux processus : l'évaporation et la transpiration. L'**évaporation** (E), est générée par tout type de surface aquatique (lacs, fleuves, océans et sols inclus). La **transpiration** (T), est d'origine végétale.

L'évapotranspiration est un paramètre important pour des études climatologiques et hydrologiques ainsi pour la gestion de l'eau d'irrigation en agriculture (figure 1 et 2).

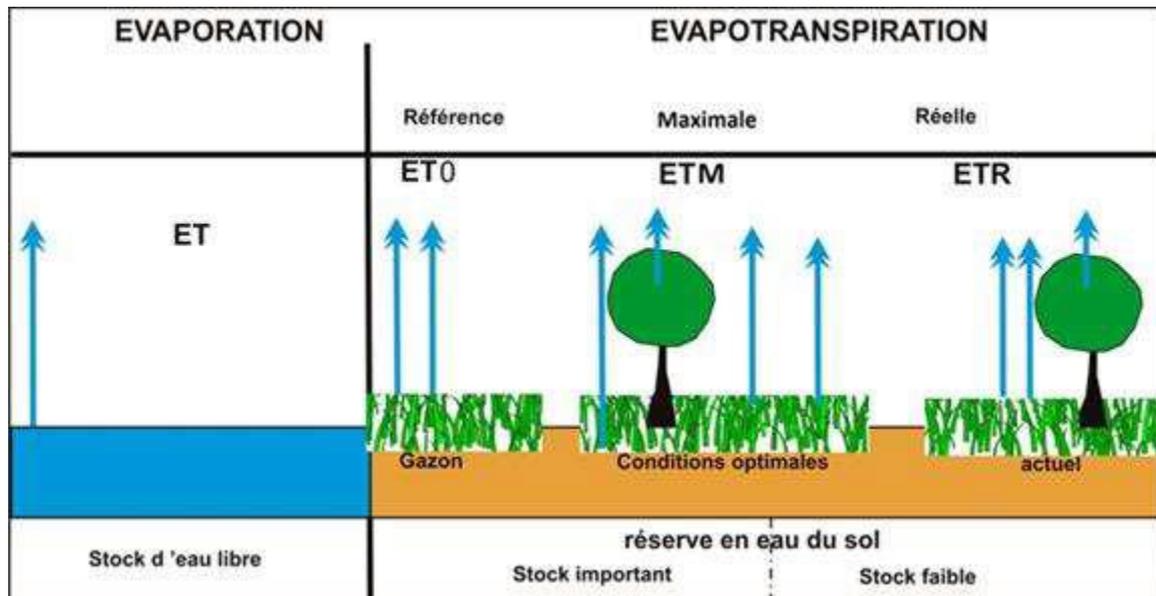


Figure 1. Évaporation et évapotranspiration (Source : Projet SUDMED, 2007)

L'évapotranspiration est un transfert de masse d'eau sous forme de vapeur à partir de l'interface sol-plante vers l'atmosphère par convection. Elle joue un rôle dominant dans le cycle hydrologique: à l'échelle globale, 2/3 des volumes d'eau précipités sur le milieu continental, retournent vers l'atmosphère sous forme de vapeur.

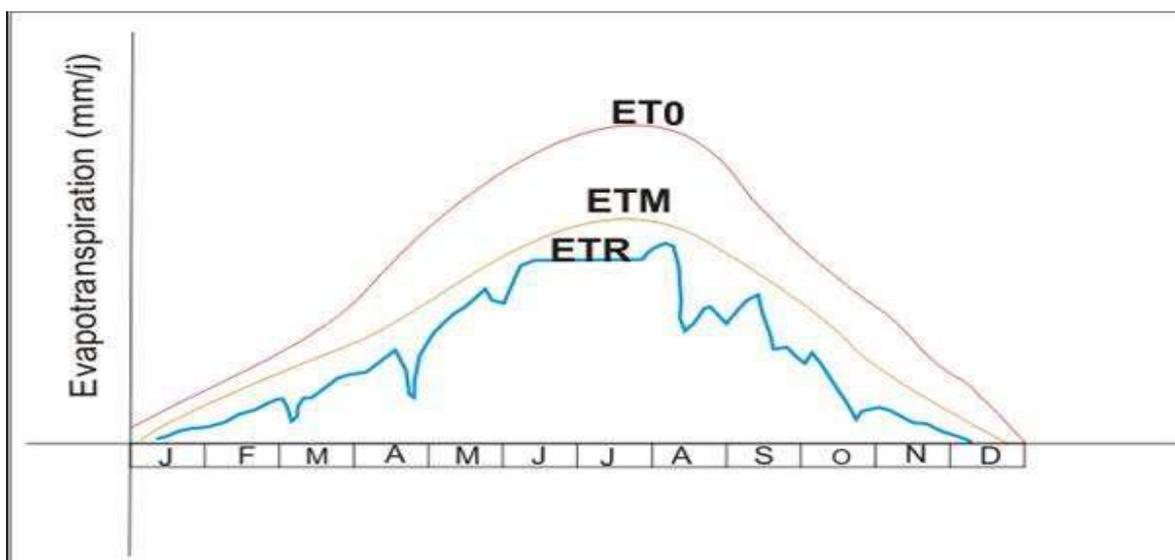


Figure 2. Schéma théorique de la variabilité annuelle de l'ET0, ETM et ETR (Source : Chahbouni, 2009)

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

Evapotranspiration réelle (ETR)

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

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

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

« *L'évapotranspiration maximale varie au cours du développement d'une culture annuelle elle augmente progressivement avec le taux de recouvrement du sol par la plante pour atteindre ETP et diminue à la fin du cycle végétatif* » (Xanthoulis, 2010). Cette forme d'évapotranspiration (ETM) est utilisée par les agronomes pour déterminer les besoins en eau des plantes (Hbaeib, 2003; Er-raki, 2007; Piedallu, 2012).

2. Méthodes de mesures et d'estimations de l'évapotranspiration

2.1. Les facteurs conditionnels de la mesure de l'évapotranspiration

D'après Allen et al (1998 et 2011), l'évapotranspiration dépend fortement de l'intervention de quatre facteurs, climatiques, géographiques, biologiques et pédologiques.

Tableau 1. Les paramètres et les facteurs conditionnant la mesure de l'ET

Types de facteurs	Paramètres
Les facteurs climatiques (pouvoir évaporant du climat)	<ul style="list-style-type: none"> - la température de l'air, - la température de la surface terrestre, - la vitesse et turbulence du vent, - la durée de l'insolation ou le rayonnement solaire, - l'humidité relative de l'air, - pression atmosphérique.
Les facteurs géographiques (essentiellement la topographie)	<ul style="list-style-type: none"> - l'état de la surface évaporant, - l'altitude, - effet du site, - la latitude, - la proximité de la mer, - orographie (exposition des versants au soleil, aux vents, pentes).
Les facteurs biologiques (le couvert végétal)	<ul style="list-style-type: none"> - les espèces végétales (stade phénologique de la culture considérée), - hauteur du couvert végétal, - résistance stomatique, - la profondeur des racines, - besoins ou non d'eau
Les facteurs pédologiques (les sols)	<ul style="list-style-type: none"> - la capacité de rétention en eau du sol, - la réserve utile dans le sol, - humidité du sol, - la texture du sol.

2.2. Les outils de mesures de l'évapotranspiration

La mesure de l'évapotranspiration est très complexe (El Garouani, 1995). Certes, les mesures directes de l'évapotranspiration (ETP et ETR) se font surtout en agronomie où on étudie chaque type particulier de cultures. En agriculture, une estimation précise de l'ET est essentielle pour déterminer les pratiques de gestion de l'eau, les systèmes d'irrigation et les régimes d'irrigation, et pour calculer le rendement des cultures (Allen et *al.*, 1998). Les résultats de ces mesures sont difficiles à utiliser en hydrologie car il y a une grande différence d'échelle entre la surface de la parcelle et celle d'un bassin versant (Mjeira, 2015). Les méthodes de mesure de l'ET devraient être subdivisées en différentes catégories, car elles ont été développées pour répondre à des objectifs très différents.

Un ensemble de méthodes visent principalement à quantifier l'évaporation sur une longue période, à partir de semaines à plusieurs mois et la saison de croissance. Un autre ensemble de méthodes a été développé pour comprendre le processus régissant le transfert d'énergie et de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère.

D'après Rana et Katerji (2000), la plupart des méthodes directes ou indirectes de mesure d'évapotranspiration se basent sur la mesure de deux classes de facteurs :

- La teneur en eau du sol et les caractéristiques physiques des surfaces à partir desquelles se produit l'évapotranspiration (hauteur, densité des plantes, rugosité du couvert végétal, albédo)
- Les variables climatiques au-dessus de la végétation telles que le rayonnement solaire, la vitesse du vent, les caractéristiques thermodynamiques de l'atmosphère.

Le tableau 2 élaboré par Rana et Katerji (2000) résume les méthodes de mesure et d'estimation de l'évapotranspiration.

Tableau 2. Classification des méthodes de mesure-estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle

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

3. Processus de transfert d'eau dans le continuum : Sol - Plante - Atmosphère

Le processus de transfert d'eau dans ce système est différent en passant d'une composante à une autre.

3.1. Processus de transfert d'eau dans le continuum : Sol-Atmosphère

Dans le sol, l'eau ne se situe plus seulement dans son état moléculaire. Avant de se diffuser vers l'atmosphère, l'eau liquide au sein des pores doit se vaporiser, afin de maintenir le flux de l'évaporation et de rencontrer la demande atmosphérique. La diffusion de la vapeur vers l'atmosphère continuera à la vitesse potentielle à condition que l'eau liquide pour la vaporisation soit suffisamment présente à l'interface sol-atmosphère.

Le transfert de l'eau sous forme liquide du sous-sol vers la surface est limité par les forces de résistance d'écoulement d'eau. Ce mouvement est décrit par la loi de Darcy, imposant un flux d'eau liquide au sein du sol proportionnel à un gradient hydraulique total. Alors, d'une façon simplifiée, le transfert de masse d'eau du sol vers l'atmosphère se fait en trois étapes :

- Transfert de l'eau liquide du sous-sol vers la surface suivant la loi de Darcy ;
- Vaporisation de l'eau liquide au sein des pores à la surface du sol ;
- Diffusion de la vapeur des pores du sol vers l'atmosphère.

3.2. Processus de transfert d'eau dans le continuum : Plante-Atmosphère

La transpiration de l'eau dans les plantes se situe via des stomates. Cette vaporisation sera limitée lorsque la plante subit un stress hydrique. Le transfert de l'eau dans les plantes vers les stomates se fait à travers les organes racinaires, les tiges et les feuilles. Ce flux est engendré par un gradient de pression hydraulique, proportionnel à la diffusivité hydraulique de l'organe et à plusieurs facteurs tant dans le sol que dans l'atmosphère.

A l'échelle macroscopique et d'une façon simplifiée, les résistances au transfert d'eau, exercées par les différentes organes des plantes, peuvent être modélisées par des résistances linéaires. Les plus importantes se développent au niveau des racines et au niveau des stomates.

4. Partition de l'évapotranspiration

La plupart des recherches ont porté sur l'ET comme un processus agrégé, mais récemment, l'accent a été mis sur l'importance de la distinction entre les deux phénomènes en les quantifiant séparément.

La partition de l'évapotranspiration (ET) en évaporation du sol (E) et en transpiration à travers les stomates des plantes (T) est difficile mais importante pour évaluer la production de biomasse et l'allocation de ressources en eau de plus en plus rares (Agam et *al.*, 2012; Van Halsema et Vincent, 2012 ; Kool et *al.*, 2014). En général, la transpiration (T) est le composant souhaité, l'eau étant utilisée pour améliorer la productivité de la plante; alors que l'évaporation (E) est considérée comme une source de perte ou d'inefficacité en eau.

Ce partitionnement est l'un des défis écologiques les plus importants et il a des implications importantes non seulement pour la ressource en eau, mais aussi pour comprendre la rétroaction entre la dynamique de l'eau et de la végétation, ainsi que pour les cycles biogéochimiques (Newman et *al.*, 2006. In. Pei Wang, et *al.*, 2015).

Une meilleure compréhension des composants d'ET peut aider à déterminer s'il est possible d'améliorer l'irrigation et d'utiliser l'eau de manière plus productive (Kite, 2000; Zhao et *al.*, 2013).

Dans ce contexte, plusieurs études ont été effectuées pour quantifier ces flux, mais elles rencontrent des difficultés à quantifier la contribution relative de l'évaporation du sol (E_s) et de la transpiration (E_t) de l'évaporation totale (ET) (Zhang *et al.*, 2010). La plupart des études de partitionnement de l' ET se concentrent sur les forêts (Moreira *et al.*, 1997; Wang and Yakir, 2000; Yepez *et al.*, 2003; Williams *et al.*, 2004; Lai *et al.*, 2006; Robertson and Gazis, 2006; Xu *et al.*, 2008; Dubbert *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2014) et les écosystèmes des prairies (Ferretti *et al.*, 2003; Yepez *et al.*, 2005; Wenninger *et al.*, 2010; Sutanto *et al.*, 2012; Dubbert *et al.*, 2013; Hu *et al.*, 2014).

5. Les outils de mesures du partitionnement de l' ET

La partition de l'évapotranspiration peut être estimée directement à l'aide de mesures isotopiques. En outre, il existe de nombreux modèles et modifications de modèles basés sur une approche combinée pour calculer simultanément l'Evaporation et la Transpiration.

5.1. Modèles de partitionnement de l'évapotranspiration

De nombreux modèles et variantes de modèles incluant le partitionnement ET sont décrits dans la littérature. Ceux-ci sont généralement classés en approches mécanistes (M) et empiriques (P), ou modèles analytiques (A) et numériques (N). Les modèles suivants ont été validés pour le partitionnement de l' ET et sont décrits brièvement: Shuttleworth – Wallace (MA); ENWATBAL (MN); Cupidon-DPEVAP (MA); SWEAT (MN); TSEB (MA); FAO dual Kc model (PA) et HYDRUS-1D (MN).

5.2. Les isotopes stables de l'eau (δ^2H et $\delta^{18}O$)

5.2.1. Définition, terminologie et normes

Les isotopes sont des atomes partageant le même nombre de protons, mais ayant un nombre de neutrons différent (Kendall et McDonnell, 1998). Certains isotopes sont plus lourds ou plus légers que d'autres, certains sont stables, alors que d'autres vont se décomposer par décroissance radioactive (Gat, 2010). De nombreux éléments ont deux ou plusieurs isotopes stables et naturels (Mook et Rozanski, 2000). Les isotopes stables ne se décomposent pas en d'autres éléments (Mook *et al.*, 2001). L'oxygène et l'hydrogène se trouvent sous de nombreuses formes dans l'hydrosphère, la biosphère et la géosphère terrestres et se combinent pour former de l'eau (Gat, 2010). Dans des conditions naturelles, deux isotopes d'hydrogène stables se produisent: 1H (99,9844 %) et 2H (0,0156 %). L'oxygène possède trois formes d'isotopes stables: 99,762 % de ^{16}O ; 0,038% de ^{17}O et 0,200 % de ^{18}O . Les combinaisons donnent neuf différentes molécules d'eau isotopiques

possibles (Horita et *al.*, 2008). Lors du processus d'évaporation, les isotopes les plus légers s'évaporent en premier, laissant derrière eux les isotopes les plus lourds (^2H et ^{18}O) (Craig et Gordon, 1965).

5.2.2. Application des isotopes stables $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ à l'estimation du taux d'évapotranspiration

L'utilisation d'isotopes environnementaux (O^{18} et H^2) avec leurs attributs uniques présente une technique nouvelle et importante pour retracer les flux dans le système de continuum sol-plante-atmosphère (Kendall et McDonnell, 1998; Mook, 2000; Wenninger et *al.*, 2010; Zhang et *al.*, 2010). La raison d'utiliser les traceurs biogéochimiques (O^{18} et H^2) est que sont chimiquement et biologiquement stables et ne montrent aucun fractionnement isotopique lors de l'absorption d'eau par les racines (Ehleringer et Dawson, 1992; Kendall et McDonnell, 1998; Tang et Feng, 2001; Yopez et *al.*, 2003; Williams et *al.*, 2004; Balazs et *al.*, 2006; Koeniger et *al.*, 2010). Ainsi que, la partition des flux d'évaporation à l'aide d'isotopes présente de nombreux avantages par rapport à d'autres méthodes telles que : des mesures de lysimètre, de flux de sève et des techniques micro-météorologiques, car ces méthodes ont plusieurs limites (Rothfuss et *al.*, 2010).

La composition isotopique de l'eau peut être directement utilisée pour évaluer le rapport entre E et T. Si une mesure absolue de l'un ou l'autre (E; T, ou ET) est connue, la quantification d'ET et de ses composants est réalisée. La méthode isotopique de partitionnement ET est basée sur une différence dans la signature isotopique de la vapeur d'eau résultant de E et de T.

Le fractionnement isotopique ne se produit pas lors de l'absorption d'eau par les racines: l'eau des feuilles pourrait être enrichie en isotopes lourds du fait de l'évaporation à travers les stomates, mais elle atteindra un état stable où l'eau qui transpirera est semblable à l'eau du sol (Williams et *al.*, 2004). Ainsi, les compositions isotopiques de l'évaporation et de la transpiration sont nettement différentes et peuvent être utilisées pour répartir les flux. Bien que cette méthode ait été proposée pour la première fois il y a plusieurs décennies (Sheppard, 1958) et qu'elle ait été largement utilisée pour déterminer les sources d'eau utilisées par les plantes (Ehleringen et Dawson, 1992; Brunel et *al.*, 1997), elle n'intègre que lentement le domaine de l'ET. Les rapports isotopiques sont traditionnellement déterminés à l'aide de la technique d'échantillonnage dite du «piège froid», dans laquelle l'air est aspiré dans un tube immergé dans de l'azote liquide ou dans un mélange d'alcool glace carbonique pour geler la vapeur (Griffis, 2013; Soderberg et Good, 2012). La vapeur est ensuite injectée dans un spectromètre de masse pour déterminer la composition

isotopique. Une comparaison entre la composition de l'échantillon et la composition mesurée des compositions isotopiques estimées de E, T et ET permet par la suite une partition (Wang et *al.*, 2010, 2012). Bien que la méthode soit coûteuse, laborieuse et présente une résolution lente, elle a néanmoins été appliquée avec succès dans de nombreuses études différentes (Griffis, 2013). Dans ce contexte, Brunel et al (1997) ont utilisé la technique isotopique pour déterminer le mélange des précipitations avec l'eau du sol, le point d'extraction de l'eau du profil du sol par la végétation et l'importance relative de la transpiration et de l'évaporation de la surface du sol. Ils ont montré que la culture 'Guiera senegalensis' a extrait l'eau à des profondeurs peu profondes du profil du sol, ce qui correspond à son vaste système racinaire superficiel. La transpiration de ces plantes ne représente que 20% environ de l'évapotranspiration totale.

Amenzou et *al.* (2003) ont utilisé les isotopes stables, fluxmètre et l'Eddy-Covariance pour surveiller la consommation d'eau saisonnière des agrumes irrigués par le goutte à goutte dans la station Agafay, au centre du Maroc. Les résultats ont montré qu'environ 37% de l'eau d'irrigation et des précipitations sont perdus par infiltration et ruissellement. De plus, la partition de l'évapotranspiration à l'aide de l'isotope stable a montré que l'évaporation du sol est très faible comparée à la transpiration. Ainsi ils ont conclu que la méthode d'irrigation appliquée par l'agriculteur est très appropriée pour le verger, mais il est nécessaire de réexaminer la quantité d'eau appliquée et le moment choisi pour l'irrigation afin de minimiser les pertes par infiltration. Zhang et *al.* (2010) ont combiné la méthode d'Eddy covariance, Flux de sève et la technique isotopique pour étudier les réponses de la transpiration et de l'évaporation du sol à un événement d'irrigation dans un verger d'oliviers (*Olea europaea* L.) au Maroc. Shoujia et *al.* (2014) ont utilisé l'approche isotopique pour partitionner les composantes de l'évapotranspiration le chêne liège de Chine *Quercus variabilis* au nord de la Chine. Les résultats ont montré que la partition isotopique a révélé que la contribution en pourcentage de la transpiration à l'évapotranspiration totale augmentait à partir du matin et atteignait ses valeurs maximales à midi.

CHAPITRE 2. La fertilisation azotée

Dans les années à venir, la production agricole devra faire face à un double défi, répondre aux besoins croissants de la population mondiale tout en préservant l'environnement et les ressources naturelles. Selon la FAO (2018), la population mondiale actuellement d'environ 7,5 milliards d'individus atteindra près de 8,6 milliards d'individus en 2030.

La production agricole devra alors être significativement plus élevée. Et ce, par l'augmentation des rendements. Celle-ci a pu se faire essentiellement par l'amélioration variétale et les techniques culturales associées, dont la fertilisation.

1. Consommation d'engrais dans le monde

Au début des années 60, la consommation d'engrais dans le monde était de 30 Mt répartis entre 27,5 Mt pour les pays développés et 2,5 Mt pour les pays en voie de développement. Depuis, cette consommation a fortement augmenté, particulièrement dans les pays en développement, pour atteindre plus de 136 Mt par an en 2000, dont 49,8 Mt pour les pays développés et 86,6 Mt pour les pays en voie de développement (FAO, 2003).

Au niveau mondial, l'approvisionnement en engrais est suffisant pour chacun des trois éléments nutritifs principaux.

La consommation mondiale d'éléments fertilisants s'est élevée à 179,4 milliards de kilos en 2007 : 61,6% d'azote, 23,1% de phosphates, et 15,3% de potasses (Planatoscope, 2019).

2. Consommation d'engrais par hectare de terre arable

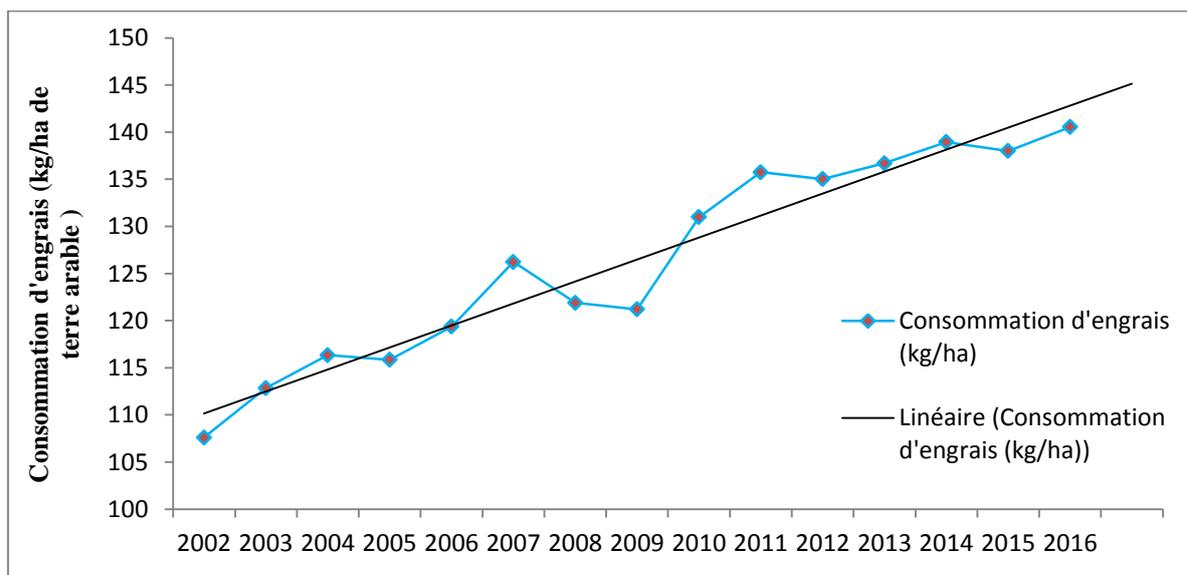
Selon la FAO (2003), un indicateur de l'utilisation des engrais est la quantité d'engrais utilisée par hectare de terre arable. Le tableau 3 montre la consommation d'engrais dans certains pays du monde, on constate une inégalité importante entre pays aussi bien au niveau de cet indicateur.

Cette répartition est due à différents facteurs et contraintes ayant pour origine les politiques agricoles, les réductions des subventions mais également une utilisation différente des engrais pour préserver l'environnement.

Tableau 3. La consommation d'engrais dans quelques pays du monde en 2016 (B.M., 2019)

Pays	Consommation d'engrais (kg/ha)	pays	Consommation d'engrais (kg/ha)	Pays	Consommation d'engrais (kg/ha)
Afrique du sud	58,5	Autriche	141,8	Canada	87,6
Albanie	126,1	Australie	68,1	Etats-Unis	138,6
Algérie	22,3	Brésil	186,1	France	163,1
Tunisie	59,3	Burkina Faso	21,6	Espagne	144
Argentine	50,3	Chine	503,3	Maroc	71,1

La consommation mondiale d'engrais en kilogrammes par hectare de terres arables, est illustrée par la figure 3. En effet, la moyenne mondiale est passée de 23,5 kg/ha en 1961 à 100,9 kg/ha en 2000 (FAO, 2003), et elle atteint jusque 124,07 kg/ha en 2016 (B.M., 2019). Cette augmentation s'est effectuée surtout dans les pays en développement.

**Figure 3.** La consommation mondiale d'engrais de 2002-2016 (Banque Mondiale, 2019)

3. Utilisation des engrais azotés en Algérie

La figure 4 montre la tendance de l'utilisation des engrais azotés (N) en Algérie et dans les pays limitrophes (Maroc et Tunisie). En Algérie, malgré ses richesses, ses potentialités et ses capacités, utilise peu d'engrais comparativement au Maroc. L'utilisation semble se stabiliser autour de 50 unités d'éléments nutritifs/ha, mais reste en deçà des normes d'intensification des cultures et d'amélioration de la productivité. Au long des années, ce manque n'est expliqué que par la pluviosité, certes un facteur prépondérant, mais mal mise

à profit par la faiblesse d'utilisation des engrais, paramètre essentiel de productivité et de qualité (FAO, 2005).

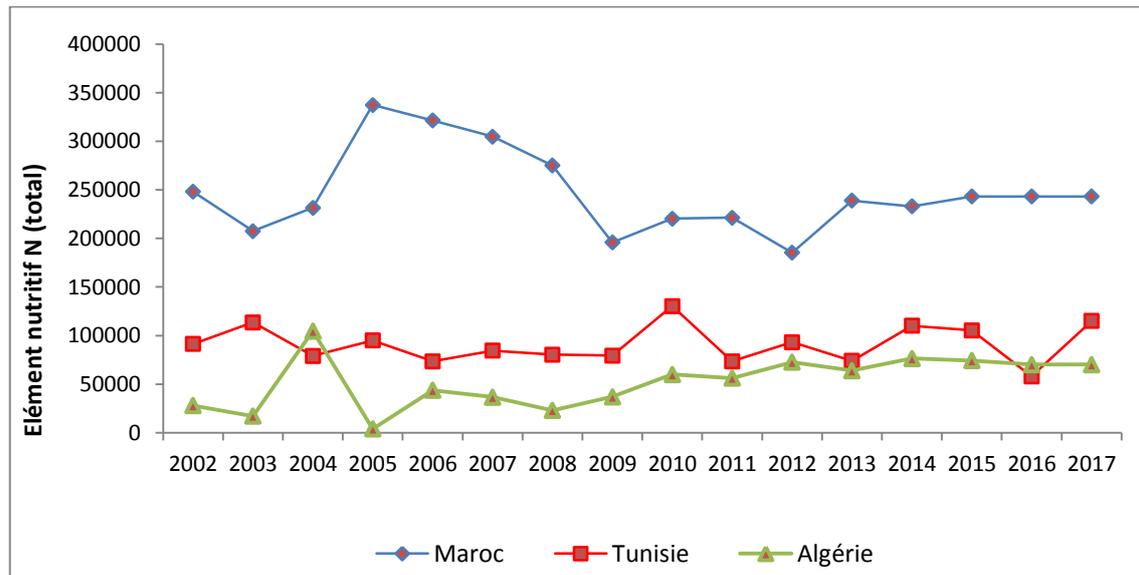


Figure 4. L'évolution de la consommation d'engrais azoté.

Selon la FAO (2019), Le Maroc consomme 5 fois plus d'engrais azoté que l'Algérie et Tunisie 2 fois plus, avec des SAU moins importantes.

4. La fertilisation en Algérie

Les potentialités agricoles en Algérie, sont localisées à 20 % dans le Nord du pays, caractérisés par des sols peu fertiles. Ces sols représentés, par un pH supérieur à 8 (Rachedi *et al.*, 2012), connaissent une faiblesse en éléments nutritifs, une faiblesse de la capacité de rétention en eau et sont pauvres en matière organique. Selon Mazoyer (1970) cette matière ne dépasse pas 2%. Cette situation contribue à la faiblesse des rendements des cultures. L'itinéraire technique qui permet de corriger ces carences, est la fertilisation, comme l'ont montré plusieurs auteurs dans leurs travaux sur les sols algériens. Dans ce contexte, Boukhalfa *et al.* (2011), ont montré que l'influence de la fertilisation phosphatée sur le comportement et le rendement de la culture de blé tendre conduite, sous irrigation, en zone aride, augmente le rendement en grains de 49,3% par rapport au témoin. Haffaf *et al.* (2016) ; Saoudi *et al.* (2016), ont conduit des essais sous le même climat semi-aride, respectivement, sur la production de semences de blé dur et d'orge, ont obtenu des rendements maximaux avec des doses similaires. Ces rendements atteignent les valeurs respectives de 33,82 et 33,25 q/ha, soit, des gains de 11,52 et 9,76 q/ha. En Tunisie et au Maroc qui bénéficient d'un climat similaire, Marouani *et al.* (2013), ont montré une mauvaise efficacité d'utilisation d'azote par la culture de pomme de terre de saison. Cette

inefficience est liée à des pertes importantes dues au phénomène de lessivage. Kchaou *et al.* (2011), ont comparé la valeur fertilisante azotée des boues à celle de l'urée, utilisant le marquage isotopique avec N^{15} , appliqué au sorgho fourrager. Ces auteurs ont constaté que les apports de boues ont provoqué des augmentations significatives des rendements et des exportations de l'azote par le sorgho, comparables à celles obtenues en présence d'urée. Ils ont conclu, que le coefficient réel d'utilisation de l'azote des boues et celui de l'urée, offre des valeurs fluctuant entre 25 et 32%. Ryan *et al.* (1997), ont montré que l'effet de la fertilisation azotée chez cinq cultivars de blé dur (Kyperounda, Marzak, Massa, Cocorit et Karim), conduite en condition pluviale, influence significativement la biomasse et le rendement. Selon la FAO (2005), en Algérie, l'utilisation des engrais en agriculture, n'est pas maîtrisée, en dépit, des efforts consentis par les agriculteurs chargés par le programme d'intensification des céréales et des agriculteurs cultivant la pomme de terre. Les cultures maraichères qui représentent des cultures stratégiques dans le pays, connaissent un développement important. Leur superficie de l'ordre de 320 100 ha en 2003, soit 0,75 % de la SAU, est passée à 511 018 ha en 2015, soit 1,18 % de la SAU. La production est passée, respectivement, de 49,08 millions de quintaux à 124,69 millions de quintaux (MADR, 2015). En dépit, de son importance dans l'économie du pays, cette filière connaît un manque de base de données et une rareté des études se rapportant à la fertilisation d'une manière générale et à l'utilisation des engrais, en particulier.

Selon l'INSID (2009), les engrais sont appliqués en l'absence de référentiels techniques, négligeant le contenu initial du sol; et par conséquent, les apports sont souvent mal fractionnés entraînant un gaspillage qui constitue une source de pollution des sols et des eaux. La fertilisation azotée, joue un rôle important dans la croissance des cultures maraichères et l'amélioration des rendements. Son efficacité d'utilisation, est impérative pour la préservation de l'environnement agricole. Il est démontré que les excès d'apports d'engrais azotés par rapport aux besoins de cultures mènent à une diminution de l'efficacité d'utilisation de l'azote des engrais par la biomasse produite, et sont sources de pollutions des eaux de surface ou souterraines. À l'inverse, une déficience en azote, même temporaire, mène le plus souvent à des réductions significatives de rendement.

5. Efficacité d'utilisation d'azote (EUN)

L'efficacité d'utilisation d'azote est une mesure quantitative de l'absorption réelle d'éléments nutritifs de l'engrais par la plante par rapport à la quantité d'éléments nutritifs ajoutés au sol en tant qu'engrais.

6. Méthode d'évaluation l'EUN

6.1. Méthode classique basée sur le rendement

Ceci mesure la réponse biologique ou l'effet de l'augmentation des taux d'engrais sur le rendement des cultures. Le rendement dépend toutefois d'une série de facteurs: certains contrôlables, d'autres non contrôlables. Ils vont tous influencer, dans une mesure variable, sur le rendement et la qualité du produit.

6.2. Méthode basée sur l'absorption de nutriment

6.2.1. Méthode du bilan azoté

Dans cette méthode indirecte, l'absorption de nutriments par la culture dans une parcelle témoin (sans application d'engrais) est soustraite de celle des traitements fertilisés. On suppose que l'absorption d'éléments nutritifs de la parcelle témoin mesure la quantité d'éléments nutritifs disponibles dans le sol, alors que celle des traitements fertilisés est la quantité d'éléments nutritifs disponibles dans le sol et les engrais. En outre, ce procédé suppose que toutes les transformations d'éléments nutritifs, à savoir la minéralisation, l'immobilisation et d'autres processus dans le cas de l'azote, sont les mêmes pour les sols fertilisés et non fertilisés. De toute évidence, il s'agit là d'une hypothèse erronée, qui peut expliquer les différences grossières entre les récupérations calculées par des méthodes non isotopiques et isotopiques (Westerman et Kurtz, 1974; Harmsen et Moraghan, 1988).

6.2.2. Méthode isotopique

La méthode isotopique est le moyen direct de mesurer l'absorption d'azote par l'engrais appliqué, et le moyen le plus fiable de suivre le flux et le devenir de l'azote dans le système sol-plante (Zapata, 1990 ; Bedard-Haughn *et al.*, 2013). Cette méthode utilisée par la division AIEA/FAO, met en évidence l'azote isotopique N^{15} qui représente l'isotope stable le plus couramment utilisé, dans les études liées à l'agriculture, permettant d'optimiser la gestion des sols, de l'eau et des éléments nutritifs dans des systèmes de culture et des zones agro-écologiques bien définis, qui favorisent l'intensification de la production végétale et la préservation de la base de ressources naturelles (AIEA, 2001).

CHAPITRE 3. LE MODELE AQUACROP

1. Les modèles de culture

1.1. Définitions

Brisson (2009) a montré que l'approche d'expérimentation permet d'appréhender la complexité de la réalité, en l'occurrence celle de la parcelle agricole et ses nombreux aspects et interactions. En outre, l'expérimentation doit répondre à certaines conditions telles que signalées par Fischer (1931) et Dagnelie (2003) à savoir : la répartition de chacun de traitements, la randomisation et le contrôle local. Par conséquent, mener une expérimentation, devient difficile, onéreux en termes de temps et d'argent avec l'augmentation de l'échelle d'étude vu qu'elle nécessite plusieurs d'années d'expériences pour être significative. Dans des situations similaires, le recours à l'utilisation des modèles de culture devient intéressant dans le sens où il va diminuer le nombre d'expérimentations tout en apportant une réponse à la question étudiée (Belhouchette, 2004).

Les modèles sont généralement définis comme une simplification de systèmes réels (Loomis et *al.*, 1979). D'après Rossitier (2003), un modèle est une représentation simplifiée de la réalité de fournir de l'information sans passer par des expérimentations réelles.

Les modèles de cultures sont des systèmes de cultures qui intègrent un grand nombre de facteur (Poussin, 1987). La compréhension de ce type de système nécessite de prendre en considération les caractéristiques de ses composantes (climat, sol, succession culturale et pratiques culturales), ainsi que leurs interactions. Ils ont été développés au cours des dernières décennies à différentes fins comme interpréter les résultats des expériences, pré-évaluer des expériences de traitement longues et nombreuses, et l'utilisation comme outils d'aide à la décision.

1.2. Développement des modèles de culture

Depuis bientôt 40 ans, les modèles de culture ou éco physiologiques fournissent une représentation conceptuelle du système sol-plante-atmosphère dans différentes conditions agro-environnementales.

Ces modèles décrivent les processus physiques et biologiques qui caractérisent la croissance et le développement d'une culture en interaction avec son environnement, à l'aide d'équations différentielles, linéaires ou non (Campbell and Norman, 1989; Semenov and Porter, 1995). Ainsi, la majorité des relations qui unissent la dynamique de croissance

d'une plante aux variables climatiques sont non-linéaires et interdépendantes, une croissance favorable étant assurée par l'existence concomitante d'une humidité adéquate du sol, d'une température adaptée et d'un ensoleillement suffisant. Par ailleurs, l'absence ou l'excès d'un ou de plusieurs des facteurs de croissance conduit à divers degrés de stress abiotiques pouvant eux-mêmes affecter variablement les différentes composantes du développement d'une culture.

Plusieurs familles de modèles ont été créées, selon des concepts souvent proches, mais avec des approches plus ou moins empiriques ou mécanistes et des spécificités qui varient selon les objectifs.

On distingue des modèles spécifiques dédiés à l'étude de la croissance du blé ou du maïs, comme CERES Wheat (Ritchie *et al.*, 1984 ; Singh *et al.*, 2008), ARCWHEAT (Weir *et al.*, 1984), CERES-Maize (Jones *et al.*, 1986) et des modèles plus génériques tels que EPIC (William *et al.*, 1989), WOFOST (Van Diepen *et al.*, 1989), DAISY (Hansen *et al.*, 1990), STICS (Brisson *et al.*, 1998 ; Brisson *et al.*, 2003 ; Brisson *et al.*, 2008) et SALUS (Basso *et al.*, 2005 ; Basso *et al.*, 2009).

En parallèle à cela, certains modèles sont davantage axés sur la compréhension du fonctionnement éco physiologique, comme SUCROS (De Wit, 1978). D'autres sont initialement dédiés à l'analyse des implications des pratiques agricoles, tels CROPGRO (Boote *et al.*, 1998). Finalement, depuis les années 90, des modèles plus complets, comme STICS ou SALUS, intègrent à la fois des objectifs agronomiques et environnementaux. Grâce à la prise en compte de formalismes génériques, offrant ainsi la capacité de simuler la croissance d'un grand nombre de cultures.

Yang *et al.* (2011), a utilisé le modèle du système d'aide à la décision pour le transfert de technologies agronomiques (DSSAT) pour simuler la teneur en eau du sol près de la surface, les pertes cumulatives de nitrate-N, les rendements associés au drainage régulier par drainage libre et les rendements associés à un contrôle contrôlé drainage avec irrigation souterraine optionnelle dans le sud-ouest de l'Ontario, Canada. Shang *et Mao* (2011) ont opté pour un modèle physico-empirique pour prédire la variation de l'eau du sol dans la zone racinaire. Schonhart *et al.* (2011) ont utilisé le modèle de rotation des cultures CropRota pour évaluer l'influence des rotations des cultures sur le système agricole. Jego *et al.* (2011), ont évalué le modèle de croissance des cultures STICS à l'aide de paramètres de cultivar de maïs étalonnés pour l'écozone de plaines à forêts mixtes de l'Est du Canada. Geerts *et al.* (2010) ont utilisé AquaCrop pour élaborer une ligne directrice sur l'irrigation déficitaire pour le quinoa en Bolivie. Todorovic *et al.* (2015) ont évalué trois modèles de culture, AquaCrop, CropSyst et WOFOST pour simuler la croissance de tournesol sous

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

Les modèles de culture doivent être calibrés pour des emplacements et des cultures spécifiques avant de s'appliquer à des utilisations pratiques. Les modèles nécessitant un grand nombre de paramètres d'entrée augmenteraient la difficulté d'étalonnage et d'utilisation. Par conséquent, un modèle de culture simple mais précis est souhaité. Pour cela la FAO (2009) a développé un modèle de culture 'AquaCrop' pour répondre à cette préoccupation.

2. L'approche Ky au modèle AquaCrop

Pendant longtemps, la réponse des cultures au déficit en eau reste la partie la plus difficile à capturer dans la modélisation des cultures. La complexité de la réponse des cultures à l'eau conduit à l'utilisation d'une équation empirique, décrite dans le Document FAO d'irrigation et de drainage n ° 33, réponse du rendement à l'eau (Doorenbos et Kassam, 1979) dont AquaCrop a évolué à partir de cette équation (1)

$$(1 - Y/Y_x) = K_y (1 - ET/ET_x) \dots \dots \dots (1)$$

Où Y_x et Y sont le rendement maximal et réel, $(1 - Y/Y_x)$ est le déclin relatif du rendement, ET_x et ET sont respectivement l'évapotranspiration maximale et réelle, $(1 - ET/ET_x)$ le stress hydrique relatif, et K_y un facteur de proportionnalité entre le déclin relatif du rendement et la réduction relative de l'évapotranspiration.

Plusieurs améliorations ont été apportées à ce modèle, en distinguant :

- La partition de la transpiration de la culture (T_r) et l'évaporation du sol (E_v)

$$ET = T + E \dots \dots \dots (2)$$

- Utilise la couverture de la canopée (CC) au lieu de l'indice de la surface foliaire (LAI) comme base pour calculer la transpiration de la plante (T_r) et l'évaporation du sol (E). La Transpiration est liée à CC , qui est proportionnelle à l'étendue de la couverture du sol, alors que l'évaporation est proportionnelle à la superficie de sol non couvert ($1 - CC$) (Araya et al., 2010). La couverture de la canopée (CC) est calculée à partir de la transpiration quotidienne en tenant compte de certaines caractéristiques physiologiques importantes de

la culture, telles que la croissance de l'expansion des feuilles, le développement du couvert et la sénescence (Steduto et *al.*, 2009; Araya et *al.*, 2010).

- Utilise l'indice de récolte (HI) pour partitionner le rendement (Y) de la biomasse sèche (B)

$$Y = HI * B \dots\dots\dots(3)$$

Ces améliorations mènent à l'équation suivante, qui est au cœur du moteur de croissance d'AquaCrop :

$$B = WP * \sum Tr \dots\dots\dots(4)$$

Où 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 de transpiration cumulée durant la période de production de biomasse).

3. Composantes du modèle AquaCrop

Le modèle AquaCrop développé par la Division des terres et des eaux de la FAO, est un modèle axé sur l'eau, qui peut être utilisé comme outil d'aide à la décision pour la planification et l'analyse des scénarios (Steduto et *al.*, 2009; Hsiao et *al.*, 2009). Les concepts de base et les procédures fondamentales de calcul du modèle sont résumés dans l'organigramme présenté à la figure 5 selon Steduto et *al.* (2009).

Aquacrop exige cinq composantes importantes pour qu'il soit fonctionnel : **le climat**, avec son régime thermique, la pluviométrie, la demande évaporatoire (ET₀) et la concentration en dioxyde de carbone ; ensuite **la culture** avec ses processus de développement, de croissance et de constitution du rendement; puis **le sol** avec son bilan en eau. En plus, quelques aspects de **gestion** ont été considérés explicitement (ex. irrigation, fertilisation, etc.), vu qu'ils affecteront le bilan d'eau du sol, le développement de la culture, et de cette manière la production finale.

AquaCrop 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 (Raes et *al.*, 2012).

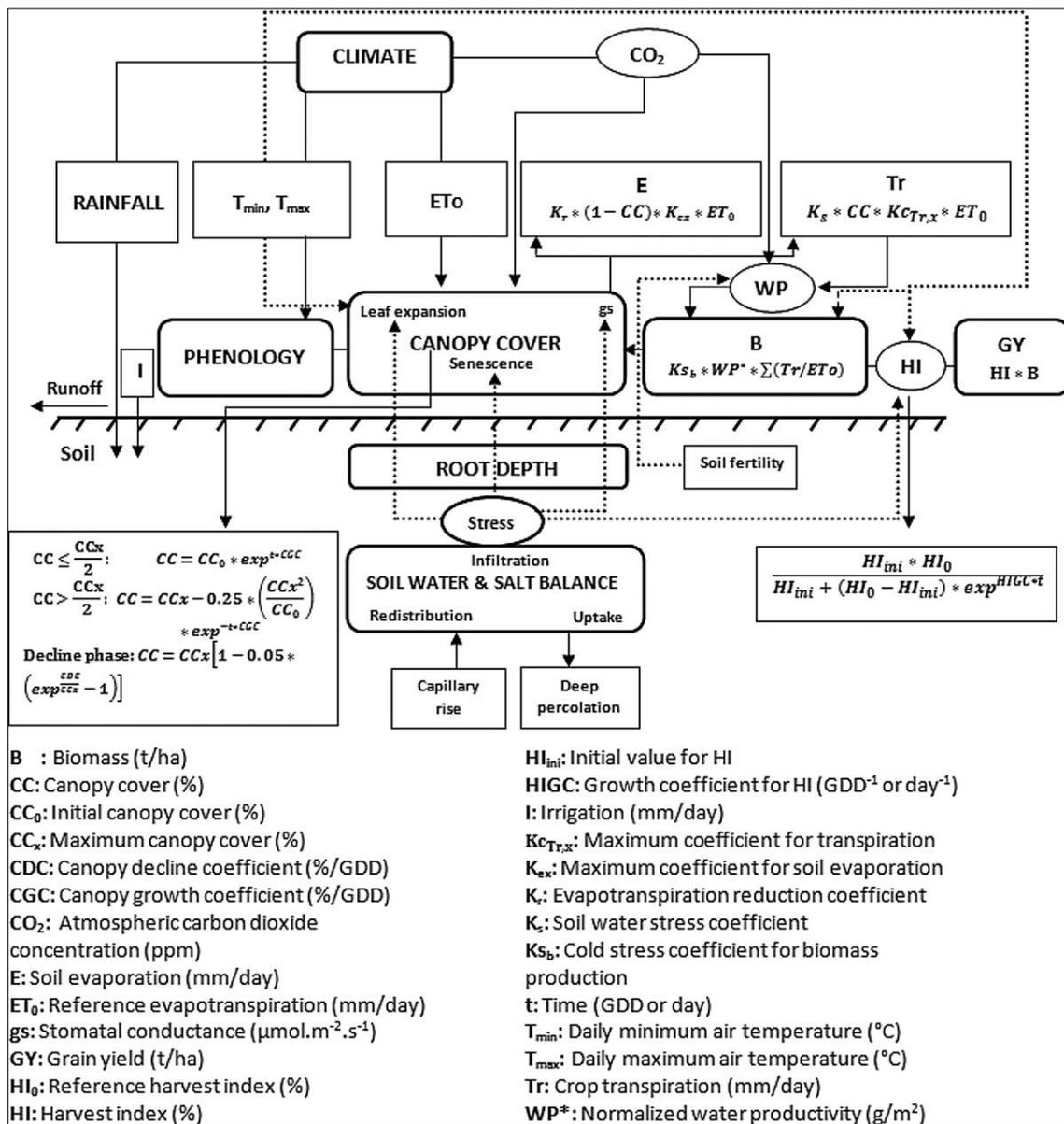


Figure 5. Schéma d'AquaCrop présentant les composants principaux du continuum sol-plante-atmosphère et les paramètres caractérisant la phénologie, la couverture de la canopée, la transpiration, la production de biomasse et le rendement final (Toumi et al., 2016)

Aquacrop est conçu pour une vaste gamme de cultures herbacées, y compris les cultures céréalières, les cultures à racines et tubercules et les cultures légumes-feuilles. Il a été largement testé avec succès par plusieurs chercheurs, sur différents climats, différents sols et différentes cultures dans le monde entier. Pour les cultures céréalières, il a été testé pour l'orge en Afrique subsaharienne (Araya et al., 2010 a), le blé en Iran (Andarzian et al., 2011) et dans l'Ouest canadien (Mkhabela et al., 2012), le teff en Éthiopie (Araya et al., 2010 b), le quinoa en Bolivie (Geerts et al., 2009) et le maïs en Californie (Hsiao et al., 2009), le soja dans la plaine du Nord de la Chine (Paredes et al. 2015). Farahani et al. (2009) ont testé ce modèle pour le coton sous un climat méditerranéen, ce qui a permis de prédire avec précision l'ET (erreur <13%), la couverture végétale (erreur de 9,5%) et le

rendement (erreur < 10%). D'autre part, Salemi et *al.* (2011) ont utilisé AquaCrop pour étudier la performance de rendement du blé d'hiver sous irrigation déficitaire dans une région aride. Pour les cultures racines/tubercule, il a été testé et calibré pour, la pomme de terre à Cordoba (Antonio et *al.*, 2013) et dans la région de Jiroft, Kerman en Iran (Afshar et *al.*, 2013) ; la tomate dans la région centrale du Ghana (Darko et *al.*, 2016). AquaCrop a bien simulé le couvert forestier (CC), la biomasse sèche aérienne (B) et le rendement (Y) de l'arachide Bambara avec des observations sur le terrain provenant de trois zones d'Afrique semi-aride avec des valeurs de R^2 de 0,88; 0,78 et 0,72 pour CC, B et Y, respectivement, (Karunaratne et *al.*, 2011).

Peu d'études ont été effectuées sur les cultures feuilles, cependant Wellens et *al.* (2013), ont évalué la performance du modèle AquaCrop pour la culture de Chou, en milieu irrigué, sous un climat semi-aride au Burkina Faso. Ils ont conclu que le modèle est un outil très utile, permettant aux utilisateurs sur le terrain, d'évaluer et d'optimiser l'utilisation de l'eau d'irrigation et le rendement de chou.

Cependant, AquaCrop a aussi ses propres limites. Salemi et *al.* (2011) ont souligné que la négligence du stress dû à la salinité constituait une limite importante du modèle. Hsiao et *al.* (2009) ont souligné qu'il était difficile de simuler avec précision la sénescence accélérée de la canopée due au stress hydrique. Cela a également été corroboré par Heng et *al.* (2009), les résultats de simulation d'AquaCrop étant moins satisfaisants lors de la simulation de conditions de stress hydrique sévères, en particulier lorsque le stress survient au cours de la sénescence.

4. Evaluation la performance du modèle Aquacrop

L'évaluation de performance d'un modèle est importante pour apporter une estimation quantitative de la capacité du modèle à reproduire une variable observée, pour évaluer l'impact du calibrage des paramètres du modèle et comparer les résultats du modèle avec ceux observés (Krause et *al.*, 2005). La pertinence de ces comparaisons a été évaluée à l'aide des critères statistiques :

4.1. Coefficient de détermination (R^2) de l'ajustement linéaire

Le coefficient de détermination (R^2) est défini comme la valeur carrée du coefficient de corrélation de Pearson. Il représente la proportion de variance dans les données mesurées expliquée par le modèle, ou peut aussi être interprété comme le ratio carré entre la covariance multiplié par l'écart-type des observations et des simulations. Cela va de 0 à 1 avec les valeurs proches de 1 indiquant un bon accord.

4.2. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (nRMSE)

La RMSE normalisée donne une indication de la différence relative entre le modèle et les observations. Elle est exprimée en pourcentage. Une simulation peut être considérée excellente si la NRMSE est inférieure à 10%, bonne si elle est entre 10 et 20%, acceptable entre 20 et 30% et pauvre lorsqu'elle est supérieure à 30%.

$$NRMSE(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \times \frac{100}{O_{avg}} \dots\dots\dots(5)$$

4.3. Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)

La racine carrée de l'erreur quadratique Moyenne ou RMSE est l'un des indicateurs statistiques les plus largement utilisés (Jacovides et Kontoyiannis, 1995) et mesure l'amplitude moyenne de la différence entre les prédictions et les observations. Il va de 0 à l'infini, avec le premier (0) indiquant une bonne performance et le dernier un modèle pauvre.

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \dots\dots\dots(6)$$

4.4. Le modèle du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (EF).

Le modèle du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (EF) détermine l'amplitude relative de la variance résiduelle comparée à la variance des observations (Nash et Sutcliffe, 1970). EF peut aller de l'infini à 1. Un EF de 1 indique un parfait accord entre le modèle et les observations, un EF de 0 signifie que les prédictions du modèle sont aussi précises que la moyenne des données observées et un EF négatif se produit lorsque la moyenne des observations est une prédiction meilleure que le modèle.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2} \dots\dots\dots(7)$$

4.5. L'indice d'accord de Willmott (d)

L'indice d'accord a été proposé par Willmott (1982) pour mesurer le degré auquel les données observées sont approchées par les données simulées.

Il va de 0 à 1, avec 0 indiquant aucun accord et 1 indiquant un parfait accord entre les données simulées et celles observées.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - O_{avg}| + |O_i - O_{avg}|)^2} \dots\dots\dots(8)$$

Plusieurs indicateurs statistiques sont disponibles pour évaluer la performance du modèle. Chacun ayant ses forces et ses faiblesses, c'est à dire que l'utilisation d'un ensemble d'indicateurs différents est nécessaire pour évaluer efficacement la performance du modèle.

CHAPITRE 4. CULTURE DE LAITUE

1. Origine et histoire de la laitue

Toutes les laitues sont issues de l'espèce sauvage *Lactuca serriola* qui pousse spontanément dans les clairières, les pentes rocailleuses et les terrains vagues depuis l'Asie et l'Afrique du nord jusqu'au nord de l'Europe.

Les romains cultivaient déjà la laitue, ainsi que les anciens égyptiens, vers 4500 avant J.C. On pense toutefois que, jadis la plante était cultivée pour ses graines oléagineuses, plutôt que comme salade. L'amertume est associée à la production de latex, la sève laiteuse qui est présente chez toutes les variétés cultivées quand elle monte en graines.

Sous leurs diverses formes, les laitues sont les légumes salades les plus importants, disponibles toute l'année selon les variétés.

Ce sont vraisemblablement les romains qui introduisirent la laitue en Grande Bretagne. On reconnaît aux laitues des vertus soporifiques depuis l'Antiquité, puisque Hippocrate (né à Cos en 456 avant J.C.) la mentionne. Le latex amer est souvent utilisé comme substitut à l'opium ou au laudanum.

Selon Collin et Lizot (2003), le nom de la laitue vient du mot lait, ce liquide blanc appelé latex qui exsude lorsqu'on coupe une partie de la tige ou de la feuille.

2. Caractéristique de la laitue

2.1. La plante

La laitue est une plante annuelle de jours longs à cycle court (2 à 3 mois). Le nom scientifique de la laitue est *Lactuca sativa*, elle appartient à la famille des Astéracées, consommé à l'état jeune avant la montée en graines. Elle développe une rosette de feuilles entières, capables selon le type, de former une pomme. Après la formation de la pomme, la tige subit une élévation et l'apex évolue en hampe florale. Le système racinaire est pivotant (25 –30 cm) épais et chevelu.

2.2. La semence

Les semences sont décrites par Lakhdari et *al.* (2010), comme des graines fines, allongées, pointues et aplaties, d'une couleur grise au centre et jaune aux pointes. Elles ont les caractéristiques suivantes :

- Nombre de graines par gramme : 800 à 1000 graines ;
- Longévité moyenne de la graine : 4 à 6 ans ;
- Température de germination : 12 °C – 15 °C ;
- Germination s'effectue 7 à 10 jours selon la température du sol.

La conservation des semences est comprise entre une température de 4°C et 10°C. Dormance induite au-delà de 25°C. Pour une facilité de semis et une meilleure capacité de germination, les graines enrobées (95%) sont préférables, selon Chalayer *et al.* (1998).

2.3. Stades phénologiques de la laitue

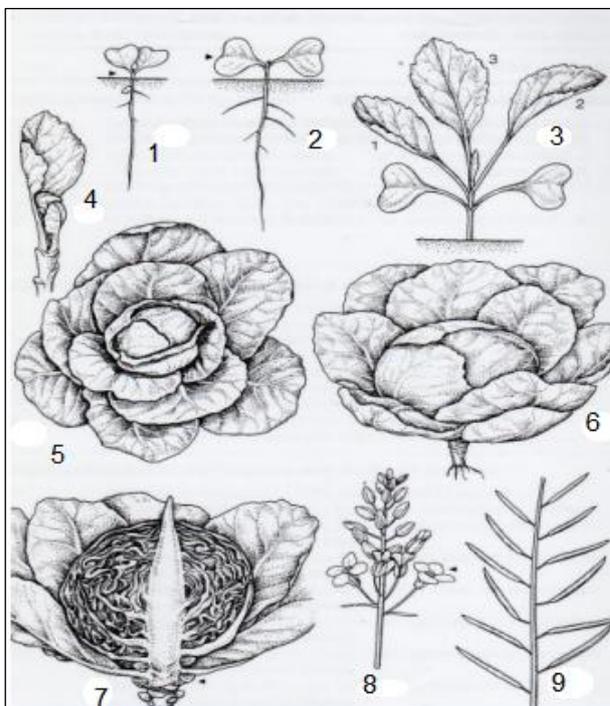
La laitue est une plante dont le cycle de croissance est court. Selon la période du semis, elle prend de 70 jours au printemps à 53 jours en été pour atteindre la maturité. Pour la laitue plantée, on compte de 40 à 55 jours de croissance aux champs. (ITCMI, 2010).

Le cycle de croissance d'un plant peut être séparé en 2 phases :

- L'établissement de la culture.
- Le développement des parties commercialisées.

La plante passe les deux tiers de son temps de développement à s'établir, puis produit plus de 60% de sa matière fraîche durant le dernier tiers.

Le cycle de développement de la laitue est constitué de plusieurs phases. Tout d'abord, il y a la germination et la levée, puis la plante commence à croître pour ensuite pommer et s'ensuit la montaison, la floraison et enfin, la maturation des graines. Bien sûr, les producteurs récoltent les laitues après la pommaison au moment de consommation de la laitue. Les étapes du cycle végétatif se résument dans la figure 6.



- 1 : levée
- 2 : cotylédons étalés
- 3 : 03 feuilles étalées
- 4 : début de formation des têtes.
- 5 : la tête a atteint 50% de sa taille finale.
- 6 : les têtes ont atteint leur grandeur, forme et dureté typique.
- 7 : la pousse principale à l'intérieur de la tête commence à sortir.
- 8 : début de la floraison.
- 9 : maturation des graines.

Figure 6. Stades phénologiques de la laitue (*Lactuca sativa*)

2.4. Exigences de la laitue

- Aime les sols argileux, bien pourvus en matières organiques, sains et sans excès d'eau.
- Température optimum : 15 à 20°C, très exigeante en lumière.
- La laitue est très exigeante en humidité du sol et de l'air.
- Qualité et rendement peuvent diminuer en cas de température élevée > 20 °C
- Résiste au froid -5 à -6°C. Salinité : 3 à 5 mm/hos/cm-1
- PH : 6 à 6,5

3. Types de variétés de laitue

On distingue 6 groupes auxquels peuvent correspondre des aptitudes culturales particulières :

○ Laitue ne formant pas de pomme

Laitue-asperge : la plante forme une tige charnue dont on consomme la moelle après cuisson et épluchage.

La laitue à couper : développe une rosette très fournie, de feuilles libres. Autrefois récoltées par poignée, sur semis dense en passages renouvelés, elles sont aujourd'hui reprises en cultures pour être vendues en plante entière. De faible poids, elle a une mauvaise tenue à l'étalage (flétrissement par évaporation).

○ Laitues formant une pomme

Laitue romaine : donnant une pomme oblongue, volumineuse mais moins serrée que dans les types suivants. Il existe des types d'hiver et d'été.

Laitue pommée frisée ou batavia : pommes à tendance aplatie, (feuilles plus large que longue) et peuvent être volumineuses.

Laitues pommées lisses ou beurre : pommes globuleuses, feuilles plus ou moins molles. Ce sont les plus répandues, car s'adaptant le mieux au climat océanique.

Laitue grasse : feuilles épaisses formant une petite pomme, assez peu recouverte. Très bonne tenue à la chaleur et résistance à la montaison

D'après ITCMI (2010), en Algérie, les variétés les plus cultivées sont classées en trois groupes à savoir : laitue romaine, laitue pommée et laitue à couper. Elles se produisent dans toutes les zones du pays (ITCMI, 2010).

4. Bienfaits de laitues

La laitue est comme beaucoup de légumes facile à cultiver, elle est une source de création de richesse à ne pas négliger, elle est caractérisée par un cycle végétatif court donc nous

pourrions transplanter toute l'année et vu son importance sur *le plan socio-économique*. *Du point de vue nutritionnel*, la laitue a une place importante puisqu'elle contient des vitamines A, B (acide folique), C, E, et des minéraux comme le calcium et le fer. Le contenu en calories, protéines, glucides, lipides et fibres (même en faibles quantités) sont des caractéristiques appréciées pour la santé. En plus de ces avantages, sa vente est plus une source de revenus monétaires pour certains agriculteurs à cause de la demande de plus en plus croissante de cette culture en milieu urbain et rural. Elle fait certainement partie des productions qui contribuent à la pauvreté de la pauvreté rurale.

5. Place de laitue dans le monde

Selon les données de la Division des Statistiques des Nations-Unies (ONU, 2016), l'Espagne est le pays qui a exporté le plus de laitues dans le monde en 2015. Par ailleurs, l'Espagne a exporté 38% de la part totale des exportations de laitues dans le monde.

○ **Quantités**

En 2015, les exportations mondiales de laitues s'élevaient à 2 milliards de kilos. 796 millions de kilos de laitues ont été exportés par l'Espagne, 156 millions de kilos par les Etats-Unis et 341 millions de kilos par le Mexique.

L'Italie est quatrième avec 123 millions de kilos de laitues exportés, suivi par les Pays-Bas avec 115 millions de kilos, la Chine avec 91 millions de kilos, la Belgique avec 61 millions de kilos, la France avec 52 millions de kilos, l'Allemagne avec 46 millions de kilos, et la Jordanie, dixième dans le classement, avec 44 millions de kilos. Le Maroc est vingt-deuxième avec 6 millions de kilos et la Turquie vingt-cinquième avec 890.000 kilos de laitues.

L'**Espagne** a exporté 38% de la part totale des exportations de laitues dans le monde. Les Etats-Unis ont quant à eux exportés 16% de la part totale.

○ **Recettes**

L'Espagne est aussi le pays qui a le plus gagné dans l'export de laitues en 2015. Avec un total de 694 millions d'Euros, tandis que le total des exportations de laitues dans le monde est de 2 milliards d'Euros.

L'Espagne est suivie par les Etats-Unis avec 484 millions d'Euros. L'Italie est troisième avec 195 millions d'Euros, suivi par les Pays-Bas avec 147 millions d'Euros, le Mexique avec 125 millions d'Euros, la Belgique avec 81 millions d'Euros, la France avec 67 millions d'Euros, l'Allemagne avec 44 millions d'Euros, la Chine et le Canada avec 42 millions d'Euro.

La figure 7 illustre les pays producteurs de la laitue dans le monde, selon la FAOSTAT (2017), la Chine est pays le plus producteur de laitue au niveau mondial avec production de

15160818 tonnes pour une surface de 632972 ha. Suivi par les Etats-Unis, avec une production de 38366820 tonnes pour une surface de 1119000 ha.

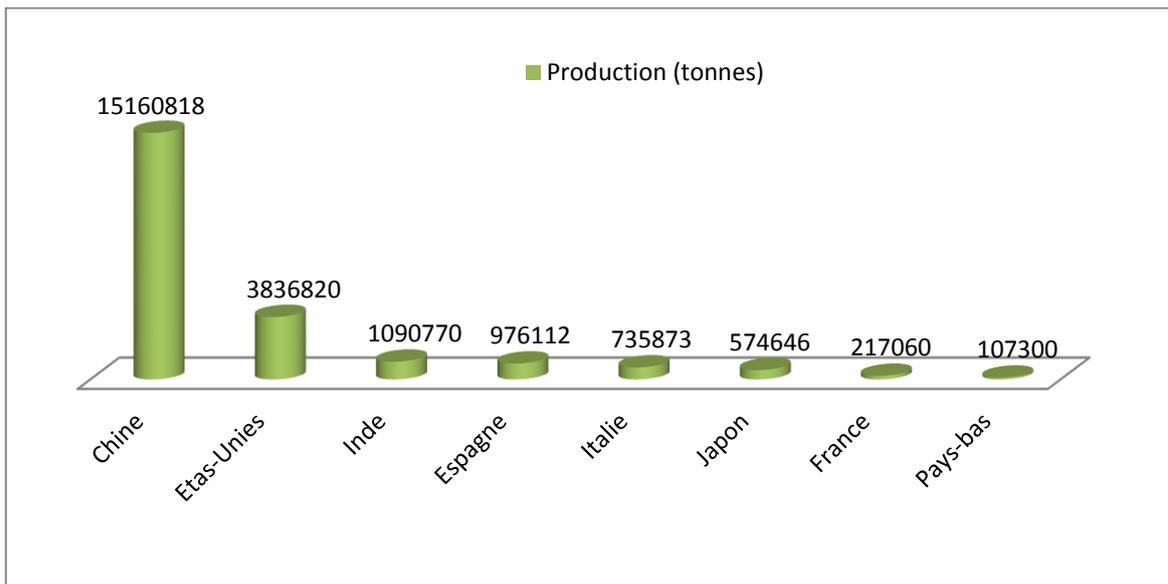


Figure 7. Les producteurs de laitue dans le monde (FAOSTAT, 2017)

○ **Prix de la laitue**

En 2015, l'Italie est le pays qui a obtenu le meilleur prix : 1,58 Euro/kg. Suivi par les Etats-Unis avec un prix moyen de 1,42 Euro/kg ; les Pays-Bas avec 1,28 Euro/kg ; l'Espagne 0,87 Euro/kg et le Mexique avec 0,80 Euro/kg.

En l'Algérie, le prix moyen d'un kilo de laitue est de l'ordre de 0,49 € (64 DZD), variant entre un prix minimum de 0,22 € (30 DZD) et un prix maximum de 0,90 € (120 DZD) (Numbeo, 2019).

Matériels & méthodes

1. Site de l'expérimentation

L'expérimentation a été réalisée au niveau de la station expérimentale de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de Mahdi Boualem (figure 8) situé au Sud-Ouest d'Alger dans la partie orientale de la Mitidja. La station de recherche est positionnée entre 36°68' Nord de Latitude et 3°1' Est de Longitude et à une altitude de 18 mètres.

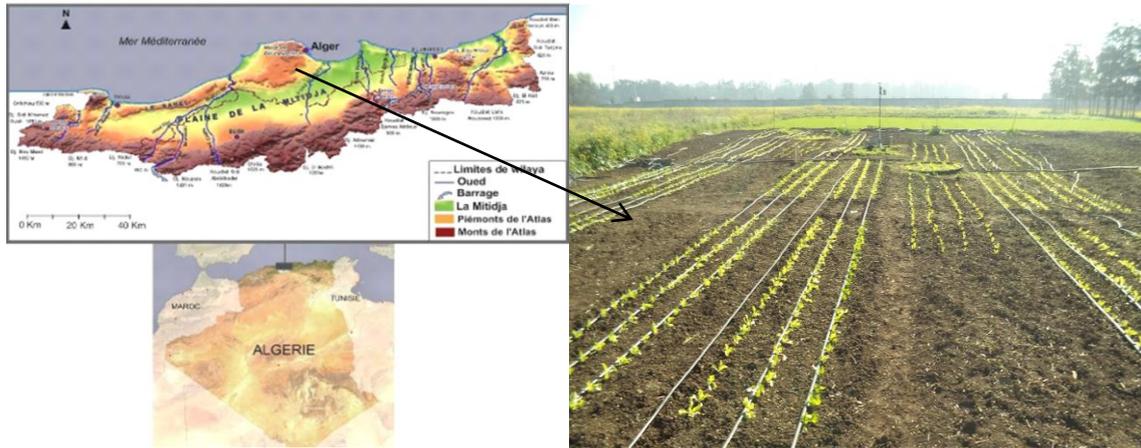


Figure 8. Localisation de la zone d'étude

2. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude

Pour donner un aperçu du climat qui caractérise la zone, les données climatiques utilisées, proviennent de la station météorologique automatique de la station de recherche. Les mesures prises, à un pas de temps journalier, portent sur 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 paramètres ont été utilisés pour calculer l'évapotranspiration de référence selon la méthode de Penman-Monteith de la FAO (Allen *et al.*, 1998).

3. Caractéristiques physico-chimique de la zone d'étude

Les caractéristiques du sol ont été déterminées grâce à un profil pédologique effectué sur une profondeur d'un mètre, comprenant trois horizons. Les analyses physico-chimiques ont été réalisées au niveau du laboratoire de physique et chimique du sol du département de pédologie de l'ENSA.

4. Protocole expérimental

L'essai est réalisé en plein champ selon un dispositif expérimental en bloc aléatoire complet, comportant quatre niveaux d'azote à savoir : T1 (0 N kg/ha), T2 (60 N kg/ha), T3 (120 N kg/ha) et T4 (180 N kg/ha) disposés en quatre blocs. Chaque bloc comporte quatre

sous- parcelles (figure 9). Chaque micro-parcelle mesure 6 m de long et 3 m de large, soit une superficie totale de 18 m² dont 4,5 m² utilisée pour l'azote marqué N¹⁵. Des engrais phosphatés et potassiques ont été incorporés au sol comme fumure de fond à raison de 100 K kg/ ha et 150 P kg/ha. Cet essai a été répété au cours des trois années (2014/2015), (2015/2016) et (2016/2017). La technique isotopique N¹⁵ a été utilisée uniquement lors de l'essai mené en 2014/2015 à cause de son coût élevé. Les quantités d'azote utilisées sont réparties le long de cycle développement de la culture, à savoir : 10% à 15 jours après transplanté (JAT), 30% à 40 JAT, 40% à 60 JAT et 20% à 75 JAT.

La saison de culture de janvier à avril pour les deux campagnes coïncide avec la saison hivernale, durant laquelle l'irrigation n'est pas nécessaire.

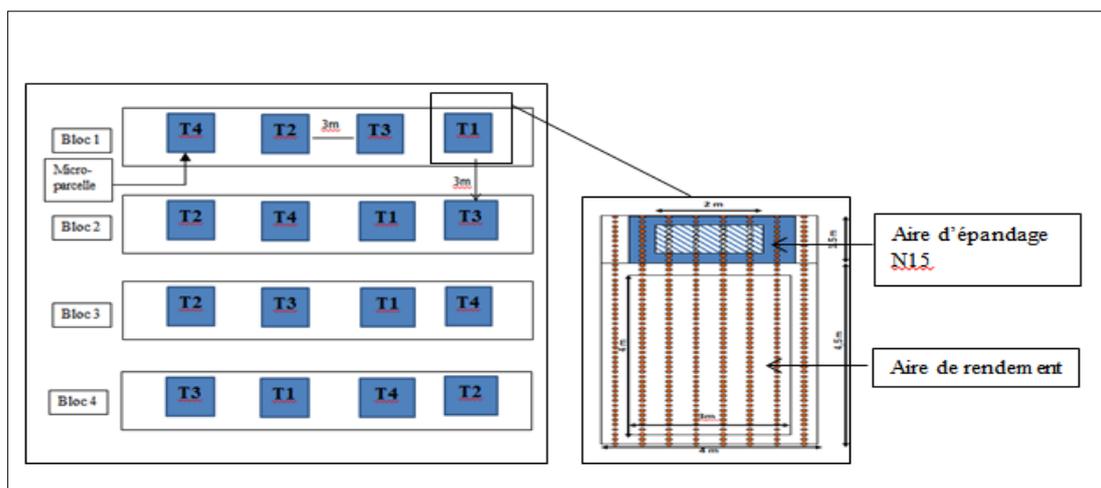


Figure 9. Dispositif expérimental

La culture prise en considération est la laitue de variété, tête de Nîmes, appartenant à la classe laitue à pommer, qui se consomme à l'état jeune, avant la montée en graines. Les graines de la laitue ont été semées dans les plaques alvéolées pendant 19 à 25 jours en pépinière, avant leur transplantation. Les jeunes plantes de laitues ont été transplantées au stade 3 à 4 feuilles sur un sol bien labouré en plein champ de la station de recherche.

5. Paramètres mesurés

5.1. Profil hydrique

La mesure des profils hydriques est effectuée à différentes profondeurs, soit, 0,1 m ; 0,2 m ; 0,3 m ; 0,4 m et 0,5 m en utilisant la méthode gravimétrique (double pesée)

5.2. Biomasse (B)

La biomasse, est l'un des paramètres essentiels de la recherche sur l'efficacité des fertilisants, en particulier chez les laitues, où la croissance de la partie aérienne est un

facteur déterminant de la valeur agricole de cette culture (Begoña Blasco et *al.*, 2011). Pour évaluer ce paramètre, tous les dix jours, six (6) plant par sous parcelle ont été coupés au niveau du sol, les échantillons prélevés sur le terrain ont été ramenés au laboratoire pour y être séché à l'étuve pendant 48 heures à 70 ° C.

5.3. Couverture de la canopée (CC)

Un suivi de l'évolution de la couverture de la canopée verte (CC) est effectué en référence par des images prises verticalement à une hauteur de 1,8 m au-dessus de la culture, par un appareil photométrique. Les images ont été analysées à l'aide de logiciel ARCGis 10.1 par la méthode **Supervised classification by maximum likelihood** (figure 10) afin de déterminer la fraction de la canopée.

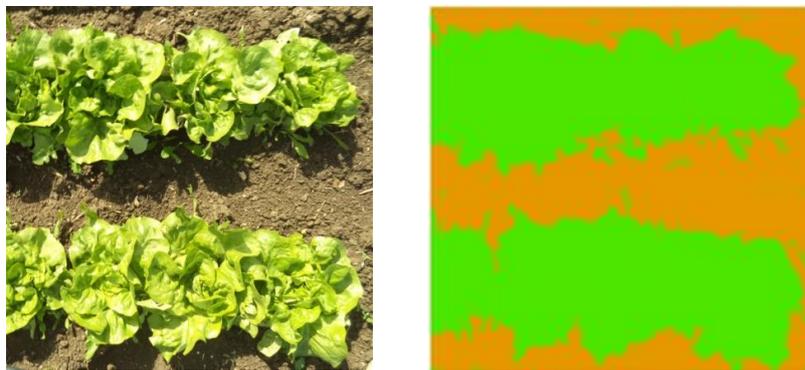


Figure 10. Analyse la fraction de la canopée verte pour le stade de croissance

5.4. Rendement

La récolte se fait manuellement, lorsque les pommes sont serrées et pleines. Des carrés des rendements (1m × 1m) ont été réalisés à la récolte pour chaque sous parcelle. Ces rendements pourront être ramenés en tonne par hectare afin de pouvoir les comparer à ceux fournis par le modèle AquaCrop.

6. Approches isotopiques

6.1. Evaluation l'efficacité d'utilisation d'azote via le N¹⁵

Pour calculer l'efficacité d'utilisation d'azote, les données primaires de base suivantes doivent être enregistrées sur le champ:

- Rendement en matière sèche (D.M.) pour la plante entière et subdivisé en parties de la plante ;
- Concentration totale en N (% d'azote dans la matière sèche) de la plante entière ou de ses parties ;

- L'abondance en% ^{15}N de la plante, qui est analysée par spectrométrie de masse ;
- Abondance d'engrais % ^{15}N .
- Engrais ^{15}N étiqueté utilisé et taux d'application de N.

Afin de déterminer la composition isotopique des plants de la laitue, les têtes de celle-ci recevant N^{15} ont été divisées en deux parties (racines et feuilles). Le poids frais a été évalué pour toutes les parties de la culture. Les échantillons ont été séchés à 70°C durant 24 heures, pesés pour la détermination le poids sec, broyés en une poudre fine en utilisant un tamis de 0,3 mm, puis homogénéisé, pour le dosage de l'azote total et des excès de N^{15} . La quantification de l'azote issu du fertilisant a été mesurée sur la base de la méthode de dilution isotopique à partir du Ndff (azote provenant du fertilisant), et du taux de l'engrais azoté appliqué, selon les équations suivantes définies par l'AIEA (2001) :

$$\% \text{Ndff} = \frac{\text{Excès isotopique en } 15\text{N de la plante}}{\text{Excès isotopique en } 15\text{N du fertilisant apporté}} * 100 \dots\dots\dots (9)$$

$$\% \text{Ndfs} = 100 - \% \text{Ndff} \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{Rendement N (kg/ha)} = \text{RMS (kg/ha)} * \frac{\% \text{N}}{100} \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{Rendement N engrais (kg/ha)} = \text{rendement N (kg/ha)} * \frac{\% \text{Ndff}}{100} \dots\dots\dots (12)$$

$$\% \text{Efficience d'utilisation d'engrais} = \frac{\text{Rendement N engrais}}{\text{Quantité d'azote apporté par le fertilisant}} * 100 \dots\dots\dots (13)$$

avec : Azote dérivé du fertilisant (Ndff) ; Azote dérivé du sol (Ndfs) ; Rendement en matière sèche (RMS); FW — Poids frais total par surface récoltée; SDW— poids sec du sous-échantillon; SFW —Poids frais de sous-échantillon;

6.2. Evaluation l'évapotranspiration via l'oxygène ^{18}O

6.2.1. Prélèvements au champ

Les isotopes stables permettent de caractériser les phénomènes affectant le réservoir d'eau étudié (sol, végétation).

Afin de pouvoir déterminer le bilan hydrique à l'échelle de ce système (sol-végétation), il est nécessaire de mesurer les flux entre les différents réservoirs du système.

Pour cela, une collecte des échantillons des différentes composantes (végétation – sol) s'est avérée nécessaire. Les différentes tâches effectuées in situ sont comme suit :

- Collecte les apports d'eau (l'eau d'irrigation et/ou bien l'eau de la pluie) ;
- Collecte les échantillons du sol pour évaluer les profils hydriques du sol ;

- Collecte des échantillons de la culture mise en place (tiges) pour l'analyse du signal isotopique.

6.2.2. L'échantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé dans la micro parcelle fertilisée par la dose 120 kg N/ha. Les missions d'échantillonnage l'eau du sol, des végétaux (les tiges), et des eaux de pluies sont collectées selon les procédures détaillées ci-dessous. Les prélèvements suivants ont été effectués :

6.2.2.1. Sol

Pour caractériser l'eau du sol, il est indispensable de connaître la quantité d'eau contenue dans chaque couche du sol, sa capacité d'échange avec les autres réservoirs d'eau et sa composition isotopique.

Les échantillons sont prélevés à l'aide d'une micro tarière (figure 11), à différentes profondeurs (0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15- 20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm et 40-50 cm), pour pouvoir examiner les relations isotopiques existant entre l'eau du collet et l'eau des différentes couches de sol. Ces relations peuvent indiquer la zone préférentielle de l'extraction racinaire si l'eau des différentes couches de sol est suffisamment bien individualisée sur le plan isotopique.



Figure 11. Prélèvement des échantillons à l'aide d'une tarière pédologique

6.2.2.2. Végétaux

Les tiges des plantes sont collectées sans feuilles, tout en supposant qu'il n'y a pas de fractionnement isotopique en allant des racines vers les tiges qui sont découpées en petites parties et mises dans des flacons étanches pour éviter l'évaporation de l'eau contenu dans les tiges.

6.2.2.3. Les apports d'eau

Il s'agit dans ce cas de :

- la quantité d'eau apportée à la parcelle par l'irrigation (eau bleue) ;
- les précipitations (la pluie) naturelles (eau verte).

Un pluviomètre (figure 12) a été installé pour recueillir ces apports d'eau pour faire l'analyse isotopique.



Figure 12. Pluviomètre

6.3. Extraction de l'eau

6.3.1. Vérification et enregistrement des échantillons

Après la campagne d'échantillonnage, les échantillons reçus au laboratoire sont vérifiés, puis enregistrés avec précaution dans un réfrigérateur afin de préserver l'eau, avant de les faire passer profil par profil dans la ligne de *distillation sous vide*.

6.3.2. Système de distillation sous vide

En raison de la demande continue de données isotopiques dans les études agro écologiques, la partition de l'évaporation et de la transpiration, ainsi que dans les études hydrologiques, une technique rapide et peu coûteuse pour l'extraction courante d'eau à partir d'échantillons de plantes et de sols est accrue.

Au cours des quatre dernières décennies, diverses techniques d'extraction ont été utilisées, notamment:

- pressage mécanique,
- centrifugation,
- microdistillation avec du zinc,
- distillation azéotropique avec du toluène,
- distillation sous vide.

Parmi ces méthodes, la distillation sous vide a été la plus communément utilisée. Des études antérieures ont montré que cette méthode est efficace et précise. Cependant, la plupart des techniques classiques sont souvent laborieuses, prennent du temps et impliquent des installations compliquées avec un appareil en verre spécialement fabriqué. De plus, les produits chimiques nécessaires pour geler et piéger la vapeur d'eau pendant l'extraction peuvent être difficiles à acquérir dans de nombreux pays en développement. Les analyses d'isotopes d'eau devenant de plus en plus économiques, simples et rapides grâce au développement d'analyseurs modernes d'isotopes au laser.

6.3.2.1. L'assemblage de verre et d'échantillons

Il contient:

- un tube horizontal;
- un tube vide (ou tube de piégeage) connecté à une extrémité du tube horizontal;
- un tube à échantillon connecté à l'autre extrémité.

Le tube à échantillon contient 5 g de terre; sur le dessus, nous avons mis de la laine de verre pour fixer l'échantillon dans le tube, en évitant de répandre l'échantillon dans tout le système d'évacuation. Un test précédent avait montré que la laine de verre était appropriée pour fixer le matériau de l'échantillon et ne maintenait pas non plus l'eau résiduelle contaminant l'échantillon.

- Congeler l'échantillon (3 minutes dans un bain froid) pour minimiser la vapeur d'eau en phase gazeuse pendant l'évacuation.

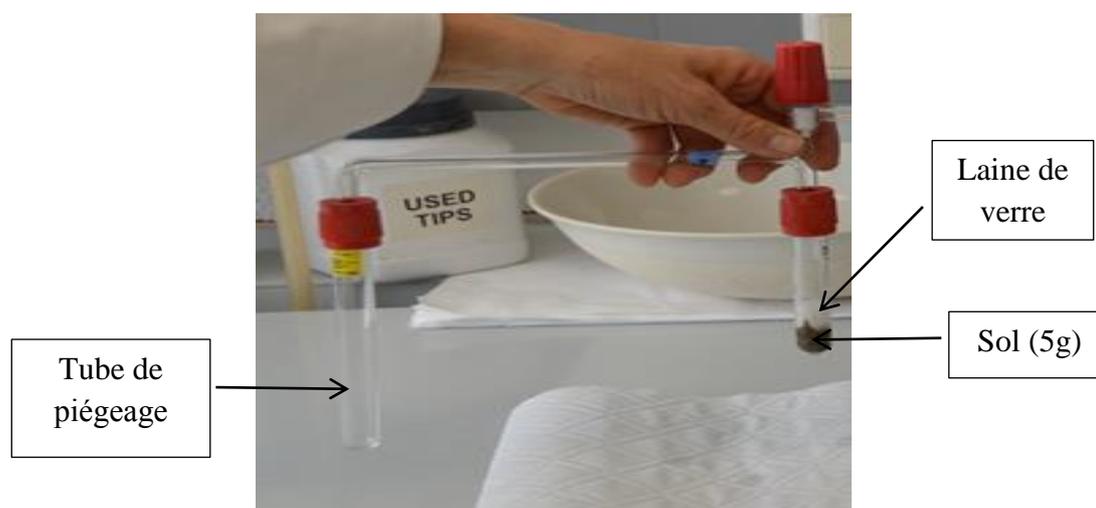


Figure 13. Tube de piégeage avec tube de l'échantillon

6.3.2.2. Système d'évacuation

Le système d'évacuation (figure 14) sert à éliminer toute contamination possible de l'eau atmosphérique. Il comprend :

- Une pompe à vide;
- Un bouton de vide;
- Et une jauge à vide.

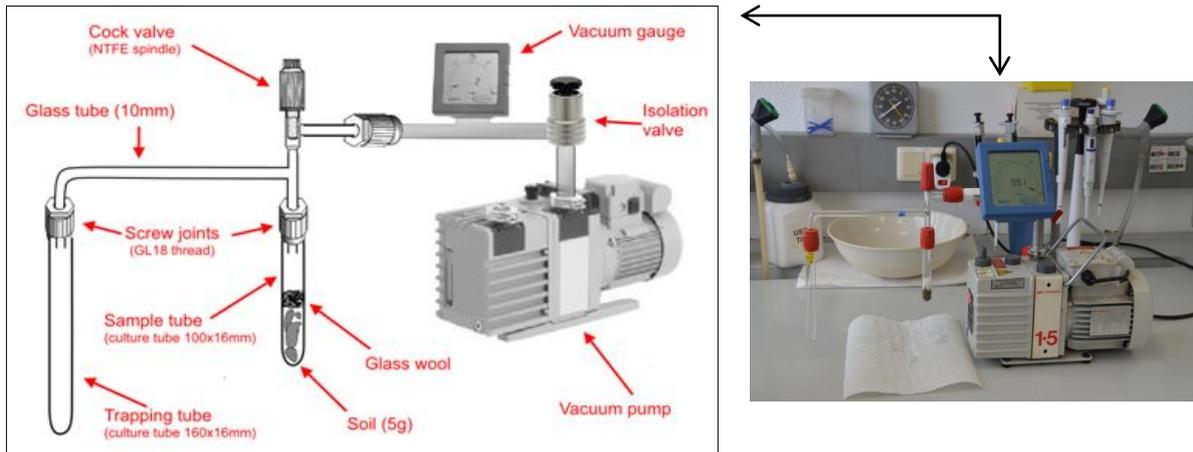


Figure 14. Système d'évacuation

6.3.2.3. Système d'extraction de l'eau

Il s'est assuré d'utiliser :

- Un bloc chauffant assurant une température de 100 ° C;
- Et un système plus froid atteignant - 53 ° C en utilisant du propanol-2 comme agent de refroidissement (figure 15).

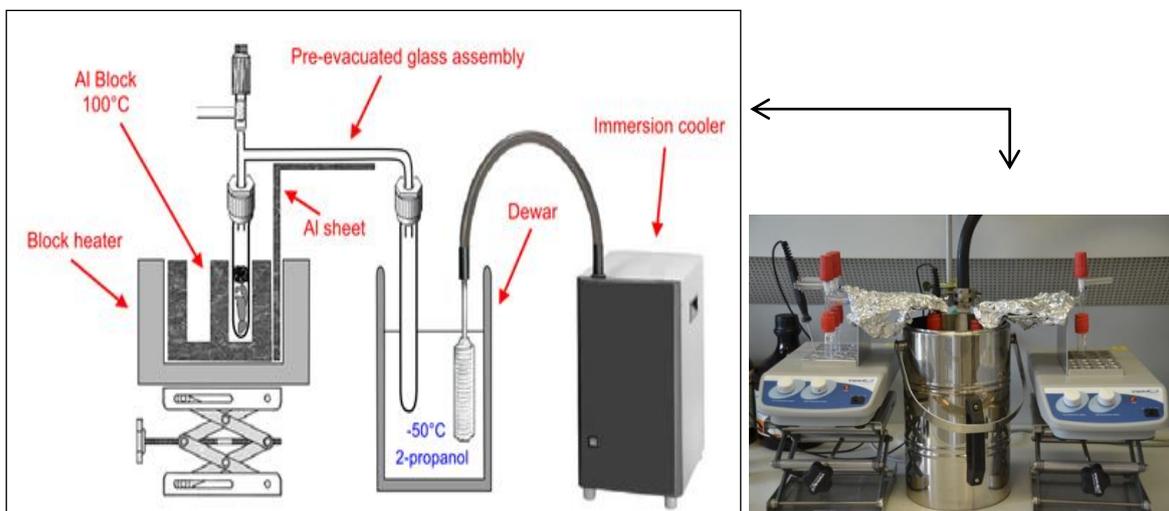


Figure 15. Système d'extraction de l'eau

- Placer l'ensemble avec le tube d'échantillon sur le bloc chauffant et le tube collecteur d'eau dans un bain froid et distiller pendant 2 heures à 100 ° C ;
- Assemblage de la vanne de ventilation (ouvrir et fermer la vanne d'arrêt) et laisser fondre la glace ;
- Pipeter l'eau dans des flacons d'échantillon de 2 ml.

6.3.3. La procédure à suivre pour l'extraction de l'eau du sol et des plantes

- Introduisons de 5g de terre + laine de verre dans le tube d'échantillon;
- Connexions du tube d'échantillon et du tube de piégeage au tube horizontal;
- Les tubes de sol sont déposés dans un récipient métallique pour les refroidir, afin de minimiser la vapeur d'eau pendant l'évacuation (3 minutes de refroidissement), après le refroidissement, ils sont prêts à être évacués en tournant la pompe à vide, le bouton de vide doit être allégé; et le bouton du tube d'échantillon doit être ouvert;
- Le vide est appliqué pendant 5 secondes jusqu'à atteindre un vide de 1 mbar;
- Le bouton du tube d'échantillon est fermé pour maintenir le vide dans le système de tubes, et retirer la configuration de l'échantillon;
- Maintenant, nous pouvons commencer l'extraction. De nombreux tubes peuvent être mis en place pour l'extraction en même temps (2h d'extraction);
- Après 2h d'extraction, les tubes sont enlevés et le sol complètement séché dans le tube d'échantillon et l'eau est totalement extraite dans le tube de piégeage;
- Après quelques minutes, l'eau est prête pour le pipetage, en 2 ml (avec un insert de 0,3 ml si nécessaire).

L'analyse isotopique des échantillons de la culture de laitue et de l'eau extraite (plante et sol) a été effectuée au Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (**CNESTEN-Maroc**).

6.4. Méthode du bilan massique isotopique (Isotope Mass Balance)

La série chronologique de la composition isotopique (^{18}O) des valeurs de l'eau du sol et la teneur en eau peut être utilisée pour déterminer la fraction d'eau perdue par évaporation et par transpiration.

L'hypothèse adoptée dans cette méthode est que l'eau prise par les racines des plantes pour la transpiration n'est pas affectée par le fractionnement isotopique jusqu'à ce que l'eau quitte la plante par les stomates (Ehleringer et Dawson, 1992; Kendall et McDonnell, 1998; Tang et Feng, 2001; Riley et *al.*, 2002; Williams et *al.*, 2004; Balazs et *al.*, 2006; Gat, 2010). Et d'après (Washburn et Smith, 1934; Zimmermann et *al.*, 1967; Bariac, 1988),

les fractionnements isotopiques liés aux processus d'absorption sont négligeables par rapport au processus d'évaporation.

$$\mathbf{m}_i + \mathbf{m}_r = \mathbf{m}_e + \mathbf{m}_t + \mathbf{m}_f \dots\dots\dots(14)$$

ET

$$\mathbf{x}_i \delta_i + \mathbf{x}_r \delta_r = \mathbf{x}_e \delta_e + \mathbf{x}_f \delta_f + \mathbf{x}_t \delta_t \dots\dots\dots(15)$$

Avec :

m : représente la masse d'eau (cm^3) ;

δ : représente la valeur de $\delta^{18}\text{O}$ de chaque composante [‰ VSMOW]

x : est la fraction de la quantité d'eau dans une composante liée à la quantité totale d'eau du système étudié.

$$x_j = m_j / m_{\text{total}} \text{ avec } j = i, r, e, t \text{ et } f$$

Les composantes sont représentées par les indices i : pour l'eau du sol initiale, f : pour l'eau du sol finale, r : l'eau pluie, e : pour l'évaporation et t : pour la transpiration.

δ_i et δ_f sont les valeurs isotopiques initiales et finales de l'eau du sol calculées en utilisant la moyenne pondérée de la composition isotopique dans chaque couche.

$$\delta_i = \delta_f = \frac{\sum_{j=1}^n (\delta_{s,j} \cdot H_j \cdot \text{SWC}_j)}{\text{SWC}} \cdot H_{\text{total}} \dots\dots\dots(16)$$

Avec :

SWC_j : La teneur en eau du sol dans la couche i ;

H_j : La profondeur de la couche i ;

n : Nombre de couche ;

H_{total} : La profondeur totale.

$\delta_{s,j}$: La valeur de la composition isotopique de l'eau dans la couche i .

La composition isotopique de l'eau évaporée (δ_e) est calculée selon la formule de Majoub (1971), tandis que la valeur de la composition isotopique de l'eau transpirée (δ_t) est supposée être la valeur de la composition isotopique de l'eau du sol et l'eau de la pluie.

$$\alpha_{\text{liquide-vapeur}} = (\delta_f + 1000) / (\delta_e + 1000) = 1,0095 \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{Donc } \delta_e = (\delta_f + 1000) / (1,0095 - 1000) \text{ et } \delta_t = x_i \delta_i + x_r \delta_r \dots\dots\dots(18)$$

La fraction de l'eau évaporée et transpirée est calculée en utilisant les formules (14 et 15) et les hypothèses décrites ci-dessus :

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x}_f \times (\delta_f / \delta_t - 1) / (1 - \delta_v / \delta_t) \dots\dots\dots(19)$$

$$\mathbf{x}_t = 1 - 1 / \delta_t \times (\mathbf{x}_e \delta_e + \mathbf{x}_f \delta_f) \dots\dots\dots(20)$$

7. Evaluation les données par le modèle Aquacrop

Les données d'entrées utilisées pour calibrer le modèle Aquacrop sont illustrées par le tableau 4.

Tableau 4. Paramètres de culture d'entrée pour calibrer le modèle Aquacrop

Description	Unités	Valeurs	
		2015/2016	2016/2017
Paramètres conservateurs			
Température de base	(C°)	7	
Température supérieure	(C°)	30	
Seuil supérieur pour l'expansion de la canopée	(-)	0,25	
Seuil inférieur pour l'expansion de la canopée	(-)	0,55	
Facteur de la forme du coefficient de stress pour l'expansion de la canopée	(-)	3	
Seuil supérieur pour la fermeture des stomates	(-)	0,50	
Facteur de la forme du coefficient de stress pour la fermeture des stomates	(-)	3	
Productivité de l'eau (WP*)	gramme/m ²	19	
Indice de récolte de référence (HIo)	%	95	
Coefficient cultural lorsque la canopée est complète	(-)	0,85	
Paramètres non conservateurs			
Densité de plantation	(plant/m ²)	15	15
Couverture de la canopée initiale CC ₀	%	2,25	2.10
Couverture de la canopée maximale CC _x	%	81	77
taille de la canopée du jeune plant transplanté	cm ² /plant	15	14
Temps reprise après la transplantation	jours	7	9
Temps de transplantation à la sénescence	jours	80	87
Temps de transplantation à la couverture maximale (CC _x)	jours	50	50
		95	99
Temps de transplantation à la maturité	jours	0,4	0,4
Profondeur effective minimale d'enracinement	m	0,2	0,2
Profondeur effective maximale d'enracinement	m	55	60
Temps de transplantation à la profondeur maximale d'enracinement	Jours		
Date de transplantation		11-01-2016	07-01-2017
Date de récolte		14-04-2016	15-04-2017
Coefficient de croissance de canopée (CCC)	(% /jour)	14,3	15,3
Coefficient de déclin de la canopée (CDC)	(% /jour)	8,0	8,0

8. Calibration du modèle pour le stress de fertilité du sol

La réponse de la culture au stress de fertilité du sol est décrite avec des paramètres conservateurs de culture, pour cela, elle doit être calibrée pour chaque cas spécifique. La calibration du modèle au stress de fertilité, exige la couverture de la canopée verte (CC) et la production de biomasse (B), enregistrées sur la parcelle subit au stress de fertilité 'parcelle stressée' et la parcelle non stressée 'parcelle de référence' (tableau 5). Le stress de fertilité du sol dans le modèle Aquacrop est évalué comme suit :

$$\text{Stress} = 100 (1 - B_{rel}) \dots \dots \dots (21)$$

Où : B_{rel} est le ratio entre la biomasse aérienne totale sèche à la fin de la saison de croissance dans la parcelle de référence (B_{ref}) et celle en état de stress (B_{stress})

La fertilité du sol affecte la productivité de l'eau (WP), le coefficient de croissance de la canopée (CGC), la couverture maximale (CCx) et la sénescence du couvert végétal. AquaCrop offre une option semi-quantitative pour évaluer les effets de niveaux de fertilité sur ces paramètres, et donc sur la réponse de la biomasse et du rendement (Mondal et *al.*, 2015).

Les effets du stress de fertilité du sol sur l'évolution de la canopée verte et la transpiration de la culture sont inclus dans le modèle à travers quatre paramètres : le coefficient de stress pour (i) l'expansion de la canopée ($K_{S_{exp,f}}$), (ii) la couverture maximum de la canopée ($K_{S_{CCx}}$), (iii) le déclin de la couverture de la canopée ($f_{CDecline}$), et (iv) la productivité de l'eau de la biomasse ($K_{S_{WP}}$).

Tableau 5. Données d'entrées pour calibrer le modèle Aquacrop au stress de fertilité du sol

	Traitements	Brel (%)	CCx sous niveau de fertilité (%)	Déclin de la canopée (-)
2015/2016	T1 (0 kg N/ha)	51	51	fort
	T2 (60 kg N/ha)	73	55	moyen
	T3 (120 kg N/ha)	100	61	petit
	T4 (180 kg N/ha)	100	58	petit
2016/2017	T1 (0 kg N/ha)	33	48	fort
	T2 (60 kg N/ha)	49	58	moyen
	T3 (120 kg N/ha)	100	73	petit
	T4 (180 kg N/ha)	93	69	petit

Résultats & discussions

1. Analyse des données climatiques

Les variations de précipitations et de l'ETP, sont montrées par la figure 16. Ces variations illustrent la répartition des pluies durant les trois années d'expérience 2014/2015, 2015/2016 et 2016/2017. Les cumuls pluviométriques reçus, entre septembre et aout, sont, respectivement, de l'ordre de 552; 551 et 525. Ceux qui correspondent aux saisons d'expérimentation (janvier à avril), elles sont près les moyennes de 211,4 ; 303,4 et 332,6 mm. L'évapotranspiration potentielle annuelle correspondante est de l'ordre de 744,3 ; 782,6 et 596,3 mm. Celles correspondantes aux saisons de culture sont, respectivement, 195,4 ; 196,5 et 137,5 mm. En dépit, des quantités pluviométriques élevées, durant la saison d'expérimentation de la deuxième année, l'ETP reste la plus élevée, par rapport aux deux autres années d'expérimentation. Cette élévation, est due aux températures moyennes élevées, durant les mois correspondants.

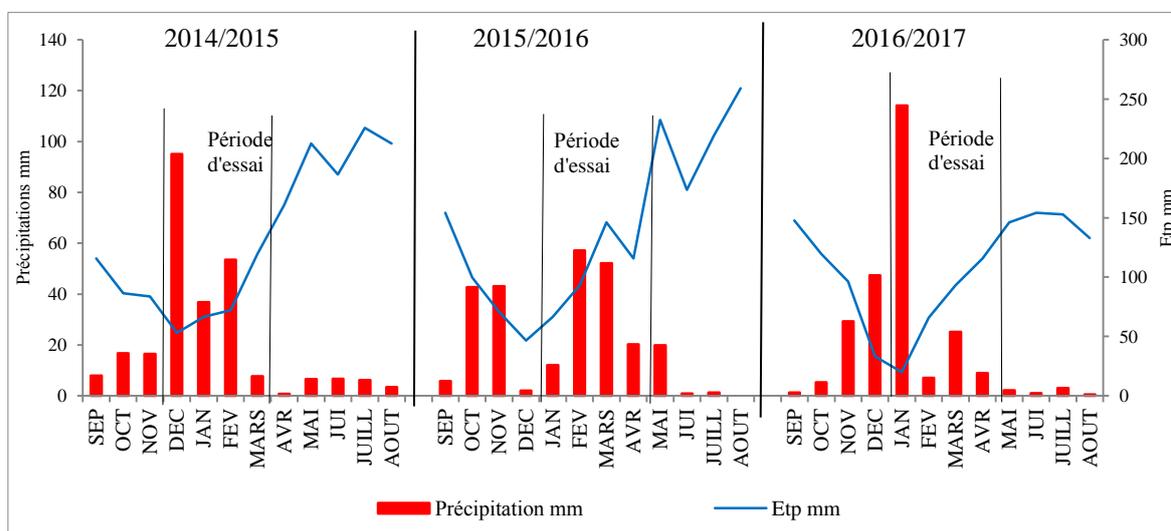


Figure 16. Précipitations, évapotranspiration potentielle (ETP) à l'échelle mensuelle pour les années d'essais 2014/2015, 2015/2016 et 2016/2017

La figure 17 montre les fluctuations des températures moyennes mensuelles durant les trois années agricoles. Elles sont comprises entre 0,4 et 47 C°.

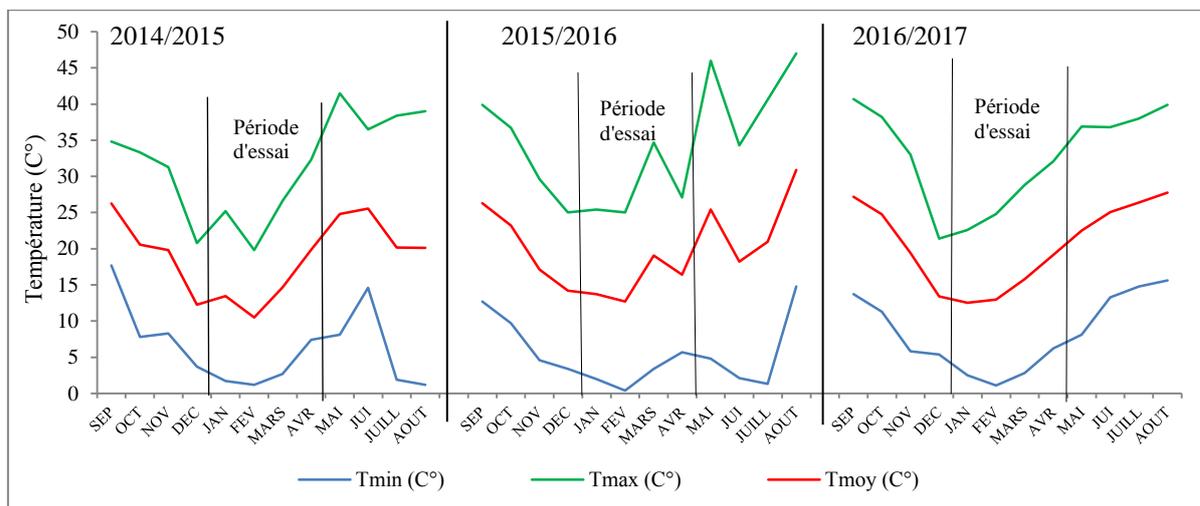


Figure 17. Variation des températures maximales, minimales et moyennes à l'échelle mensuelle pour les années d'essais 2014/2015, 2015/2016 et 2016/2017

2. Caractéristiques physico-chimiques du sol

Les résultats granulométriques indiquent que le sol est caractérisé par une texture argilo-limoneuse (tableau 6). Les résultats des analyses chimiques montrent que le sol est caractérisé par un pH basique (environ 8). La teneur en matière organique du sol est faible (moins de 2%), ce qui entraîne une mauvaise rétention d'eau et de minéraux

Tableau 6. Propriétés physico-chimiques du sol

Paramètres	Horizon 1 (0-25 cm)	Horizon 2 (25-55 cm)	Horizon 3 (> 55 cm)
pH	7,87	7,77	7,8
Conductivité électrique (dS/m)	0,17	0,17	0,17
Densité apparente	1,28	1,29	1,29
Humidité à saturation	44,86	43,19	42,5
Humidité à la capacité au champ	33,52	33,50	34,29
Humidité au point de flétrissement	22,87	23,26	21,60
Granulométrie			
Argile (%)	42,81	48,5	51,89
Limon (%)	48,35	44,67	44,2
Sable (%)	7,98	7,77	7,8
Texture (USDA)	Argilo-limoneuse	Argilo-limoneuse	Argilo-limoneuse

3. Effet de la fertilisation sur la biomasse aérienne et le rendement

La figure 18 montre, l'évolution des doses d'azotes apportées à différents stades phénologiques de la plante. Cette évolution est appuyée par l'analyse de la variance, qui a montré, un effet très hautement significatif ($p < 0,001$), de la biomasse aérienne fraîche et sèche, en relation avec l'augmentation des doses d'azotes apportées. Un maximum de biomasse fraîche et sèche sont atteints à la dose de 120 kg N/ha. Au-dessus de ce niveau, l'augmentation du taux d'azote est non significative. Ce résultat concorde avec celui de

Maurice *et al.*, (1985), qui a montré, une fertilisation avec des doses élevées, entraîne une diminution de la biomasse aérienne. C'est le cas de la première année (2014/2015).

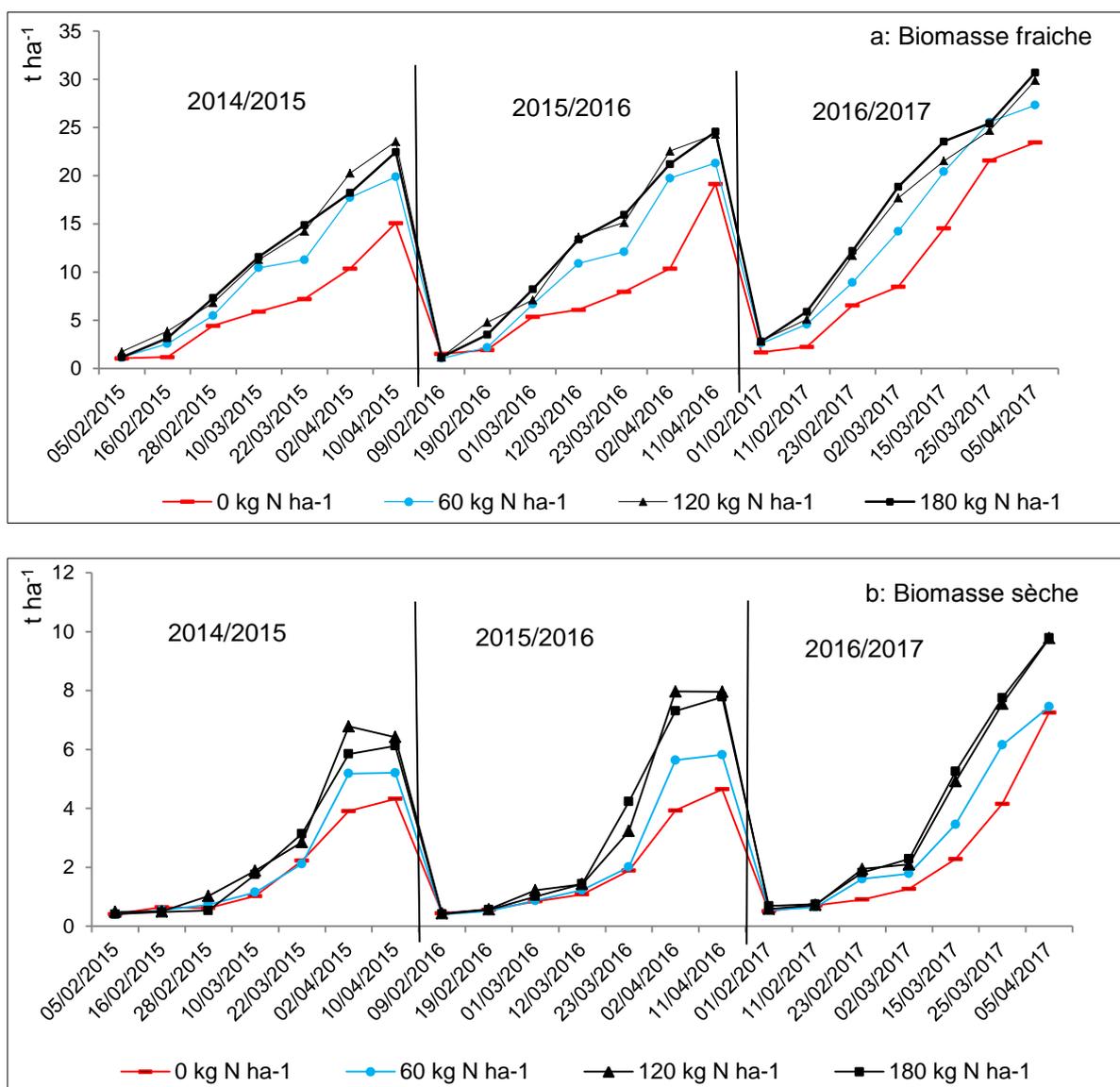


Figure 18. Effet de différents niveaux de fertilisation sur l'évolution de la biomasse aérienne fraîche (a) et sèche (b) pour les trois saisons de croissance

La figure 19 illustre les rendements de laitue en fonction des doses d'azotes appliquées. En effet, le graphique montre que, durant les trois campagnes d'expérimentations, les rendements de laitue les plus élevés (57,93 et 58,46 t/ha), sont obtenus en appliquant les doses de 120 et de 180 kg/ha. Ces doses sont très hautement significatives ($p < 0,001$) comparativement, à ceux obtenus (26,27 et 45,49 t/ha) en apportant les doses minimales inférieures à 60 kg/ha.

Ce résultat concorde avec ceux de Boroujerdnia *et al.*, (2007) et Shahbazie (2005), qui ont rapporté que l'augmentation du niveau d'azote de 0 à 120 kg de N/ha, a un effet positif sur la production de laitue. Néanmoins, dans le détail, le traitement T4, de l'essai de l'année

2014/2015, montre un rendement relativement plus faible de l'ordre de 50,17 t/ha, par rapport à celui (54,25 t/ha) du traitement T3, de la même année.

La différence évaluée à 3,08 t/ha, peut s'expliquer par la toxicité des plantes ou à la non-attraction de l'azote par les plantes résultant de la consommation d'excès d'engrais azoté, tel que souligné par Tabatabaie et Malakoutie (1997). La réponse de la laitue pour les rendements, est considérablement, plus élevée en 2016 et 2017 qu'en 2015. Ce résultat est lié aux quantités de pluies plus élevées.

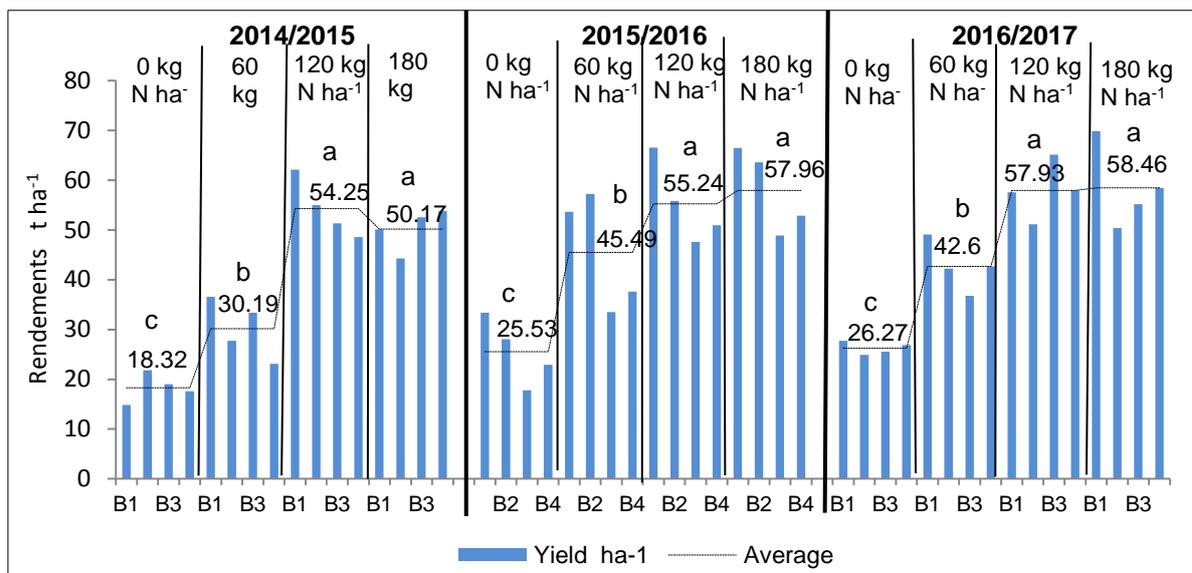


Figure 19. Effet de différents niveaux de fertilisation sur le rendement pour les trois saisons de croissance [a, b et c représentent des différences significatives ($p < 0,05$)]

Dans cette étude, le rendement moyen obtenu par la dose 120 kg N/ha, durant les trois campagnes agricoles, fluctue entre 54,25 à 57,93 t/ha, soit en moyenne 5,5 kg/m². En effet, Boroujerdnia *et al.* (2007) obtiennent un rendement de l'ordre de 7 kg/m² avec la dose de 120 kg N/ha. La différence peut être expliquée par le choix de la variété, la fertilité des sols et les précipitations. Les résultats de la présente étude, suggèrent que l'application d'azote sous forme d'urée à raison de 120 kg N / ha, peut être suffisante pour couvrir les besoins en N de la culture de laitue. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Boroujerdnia *et al.*, (2007) ; GREN (2014) ; Awaad *et al.*, (2016) et Gonzalez (2017).

4. Effet de la fertilisation azotée sur la teneur en azote (N %)

La figure 20 montre une fluctuation, de l'assimilation des doses d'azotes de 0 à 120 kg N/ha par les feuilles et les racines dans les différents blocs. Statistiquement, ces résultats montrent une différence très hautement significative ($p < 0,001$). Le taux moyen d'assimilation de l'azote passe de 2,01 à 3,55% dans la partie aérienne, il est de 0,69 à 1,38 dans la partie racinaire. Au-delà de 120 kg N/ha, la teneur en azote diminue dans les deux parties aérienne et racinaire. À la dose de 180 kg N/ha, les résultats montrent une

inefficacité de son utilisation par la plante. Ce résultat va dans le sens de celui signalé par Lawlor *et al.* (2001). Une relation très étroite ($r = 0,86$) est constatée entre les doses d'azotes et la teneur de cet élément dans la plante entière (feuilles + racines).

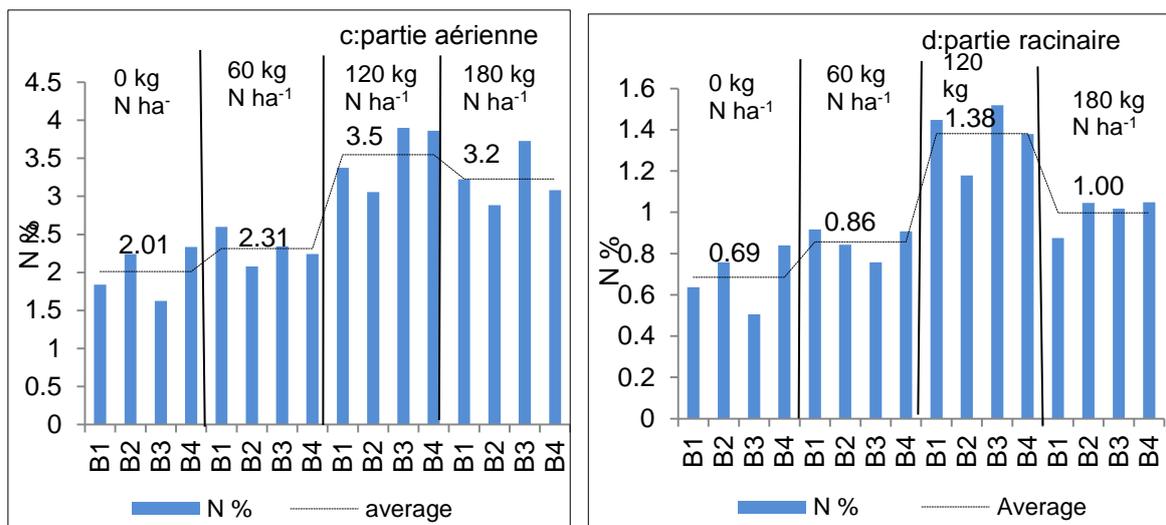


Figure 20. Effet de différents niveaux de fertilisation sur le taux d'azote total (N %) au niveau des feuilles (c) et des racines (d) de la laitue

5. Valorisation de l'azote par la plante

La contribution de N¹⁵-urée (Ndff) et N-sol (Ndfs) à la quantité totale d'azote absorbée par la partie aérienne (feuilles) et la partie souterraine (système racinaire), est illustrée par la figure 21. Cette dernière, montre que l'utilisation de l'azote isotopique détermine davantage la part réelle de l'azote assimilé par les apports d'engrais (Ndff) et évalue avec précision la part d'azote du sol (Ndfs) qui contribue à l'alimentation de la culture. En effet, d'après la figure 22 (e et f), il est constaté qu'à la dose de 60 kg N/ha, la culture valorise au mieux, l'azote contenu dans le sol, par rapport à l'azote apporté. Une meilleure valorisation de Ndff par la culture, est effectuée à la dose 120 kg N/ha, elle est de 70,79% pour les feuilles, et de 59,47% pour les racines. Le Ndfs a diminué de manière significative, en rapport avec l'augmentation des doses d'applications d'azotes. Ces observations sont compatibles avec les travaux de recherche de Zhaoming, *et al.*, (2016) sur le blé d'hiver et Kchaou *et al.*, (2011) sur le sorgho.

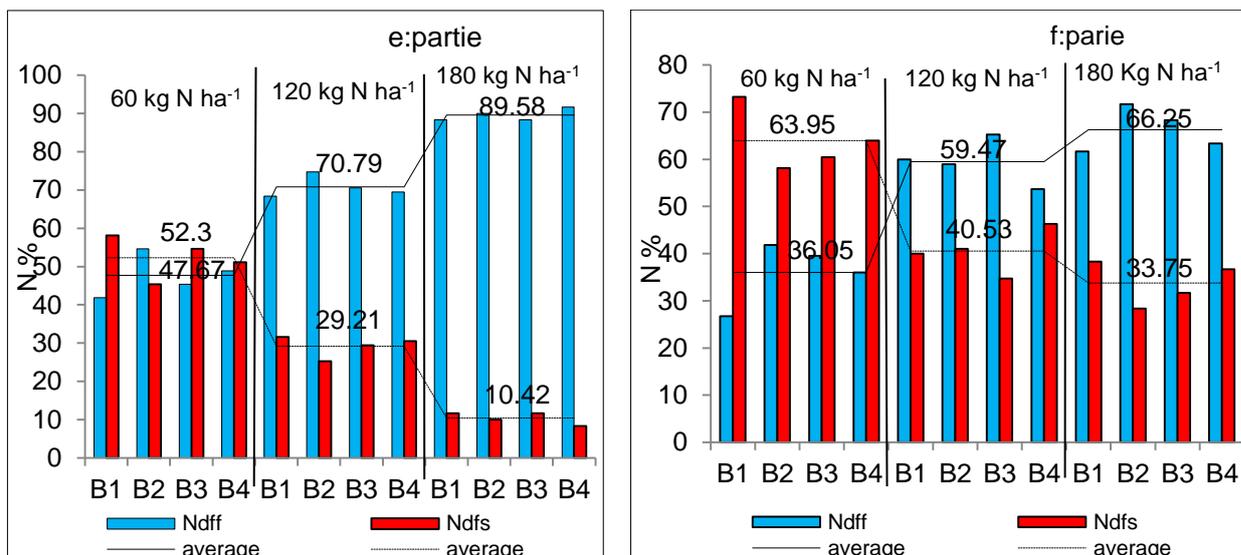


Figure 21. Source d'azote dans la partie aérienne (e) et système racinaire (f) de la laitue

6. Efficience d'utilisation d'azote (EUN)

L'efficience d'utilisation d'azote, est un indicateur important pour l'application d'engrais azoté. Dans ce contexte, la figure 22 illustre la variation du pourcentage d'efficience d'utilisation d'azote en fonction de seuils définis. Pour les doses allant de 60, 120 à 180 kg N/ha, l'EUN varie, respectivement, de 65,42; 74,48 à 68,38%. Le pourcentage d'efficience d'utilisation d'azote (EUN), a diminué de 74,48 % à 68,38 % en augmentant la dose de 120 à 180 kg N/ha. Ces résultats sont similaires à ceux signalés par Khelil *et al.* (2005) et Kchaou *et al.* (2011). La dose 120 kg N/ha permet d'aboutir aux meilleures efficacités. C'est-à-dire 74,48% de l'engrais appliqué, est consommé par la culture de la laitue. Les 25,52% restants de N, sont soit dans le sol, soit perdus par le lessivage. La laitue est une culture à cycle court, elle valorise au mieux l'azote disponible, tel que signalé par Edith *et al.* (2017).

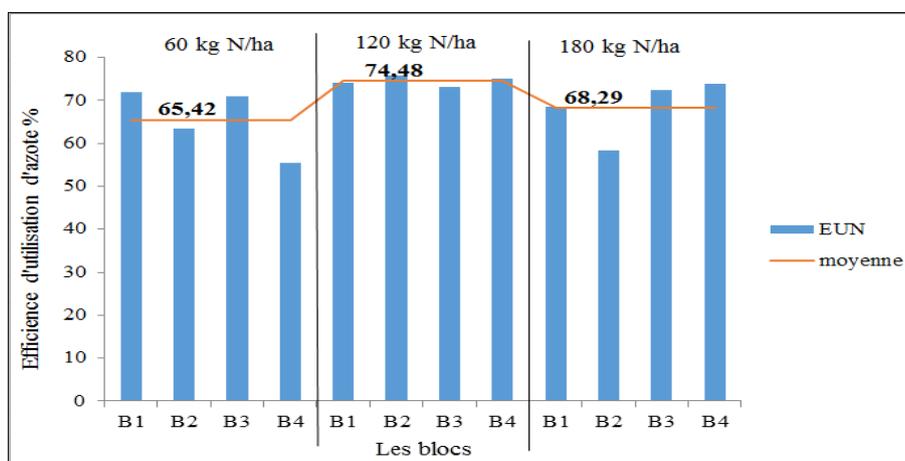
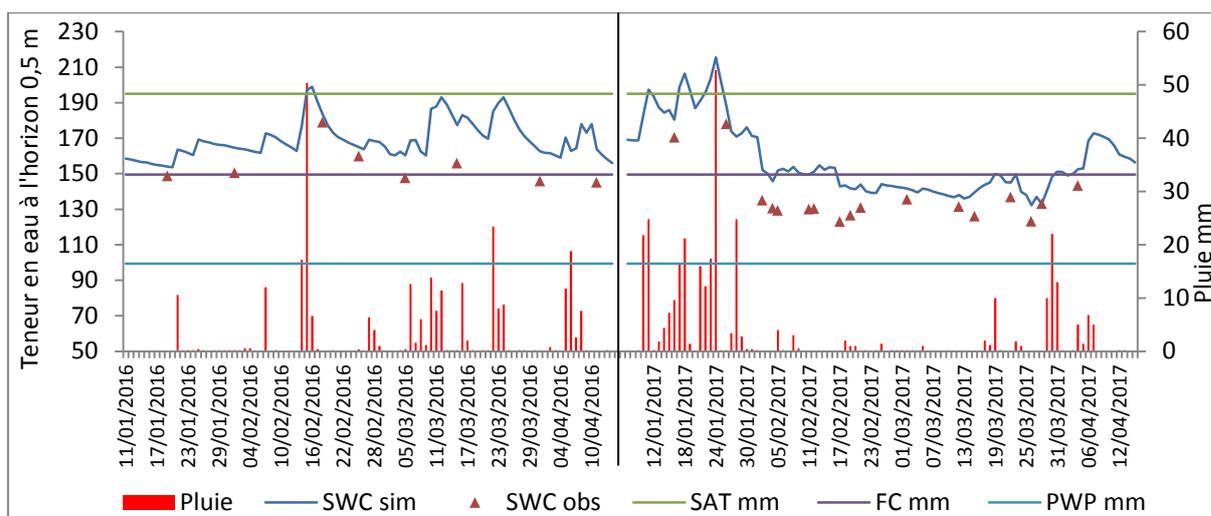


Figure 22. Variation de l'efficience d'utilisation l'azote par la laitue, exprimés en pourcentage (%)

7. Calibrage et validation du modèle AquaCrop

7.1. Bilan hydrique

La figure 23 illustre la variation de la teneur en eau totale dans l'horizon 0,50 m mesurée sur le champ et simulée par le modèle Aquacrop. La comparaison graphique et les résultats statistiques montrent que la teneur en eau du sol a été modélisée de manière satisfaisante pour les deux campagnes 2015/2016 et 2016/2017 dont le $nRMSE$ est de l'ordre de 7,10 et 9,5% ; r est de 0,84; $RMSE$ est de l'ordre de 13,0 et 17,4 mm, respectivement. D'après cette figure, la dynamique de la teneur en eau (SWC) simulé de manière adéquate et a suivi la tendance des valeurs mesurées avec une certaine surestimation de SWC pour les deux campagnes (2015/2016) et (2016/2017). Les simulations, ainsi que les mesures sur le champ répondent bien au l'approvisionnement en eau par la pluie. Un bon accord a été constaté entre les valeurs mesurées et simulées. La même observation a été soulignée par plusieurs chercheurs, Toumi et *al.* (2016) sur le blé d'hiver sous condition semi-aride, El Mokh et *al.* (2017) sur l'orge sous conditions arides. Iqbal et *al.* (2014) soulignent la bonne adéquation entre la teneur en eau du sol simulée et mesurée.



SAT : humidité à saturation ; FC : Humidité à la capacité au champ et PWP : Humidité au point de flétrissement

Figure 23. Teneurs en eau observées comparées aux teneurs en eau simulées pour les saisons de croissance (2015/2016) et (2016/2017)

7.2. Résultat de calibration du modèle

Les résultats expérimentaux du rendement, la couverture de la canopée et de la biomasse aérienne sèche sous différents niveaux de fertilisation sont présentés dans le tableau 7 pour la saison d'étalonnage (2015-2016) et la saison de validation (2016-2017). Le modèle AquaCrop (V6.1) a été étalonné pour la campagne 2015-2016, en utilisant l'ensemble des données culturales pour le traitement T3 (120 kg N/ha).

Le rendement sec et la biomasse aérienne sèche les plus faibles observés sont de l'ordre de 4,021 t/ha et 4,125 t/ha sous le traitement T1 (0 kg ha⁻¹) en 2015-2016, et les plus élevés sont, respectivement, 9,199 t/ha et 9,785 t/ha sous le traitement T4 (180 kg/ha) en 2016-2017.

Tableau 7. Résultats de calibration et de validation de la biomasse, le rendement et la Couverture de la canopée maximale sous différents niveaux de fertilisation en 2015-2016 et 2016-2017.

Traitements	Biomasse (t/ha)		Rendement sec (t/ha)			CCx (%)		
	Obs	Sim	Obs	Sim	SD (±%)	Obs	Sim	SD (±%)
Calibration (2015/2016)								
T1	4.125	4.785	4.021	4.546	(6.70)	51	44.80	(1.68)
T2	5.872	6.806	5.234	5.785	(11.68)	55	54.10	(5.76)
T3	7.969	9.320	7.834	8.854	(8.27)	61	63.90	(2.67)
T4	7.788	9.100	7.626	8.645	(8.40)	58	63.70	(3.55)
Validation (2016/2017)								
T1	5.252	5.733	4.253	4.873	(1.29)	48	47.30	(3.38)
T2	6.452	7.124	5.371	6.768	(5.05)	58	57.30	(0.86)
T3	9.775	10.709	9.045	10.173	(5.72)	73	77.90	(2.72)
T4	9.785	10.699	9.199	10.164	(8.31)	69	76.00	(2.25)

La figure 24 montre la comparaison entre la couverture de la canopée (CC) et la biomasse aérienne sèche (B) simulées et observées pour la période d'étalonnage (2015/2016). Cette figure montre qu'il existe une correspondance étroite entre la CC et B observés et simulés. Le modèle AquaCrop est capable de simuler ces paramètres. Dans l'ensemble, l'accord entre la CC et B simulés et observés est satisfaisant avec $0,64 < R^2 > 0,81$, $18 < nRMSE > 46,3$ et $0,78 < d > 0,94$; $0,92 < R^2 > 0,94$; $21,6 < nRMSE > 34,5$; $0,91 < d > 0,96$, respectivement. Il est également important de noter que le modèle AquaCrop simule correctement la CC depuis le semis jusque la phase de croissance maximale dont la CCx est atteinte. Cette observation a été signalée dans plusieurs études, Andarzian et al. (2011); Xiangxiang et al. (2013) et Toumi et al. (2016). D'après la figure 25, il est clair que les deux paramètres (CC) et B ont été surestimés par le modèle AquaCrop. Pawar et al. (2017) ont montré que le modèle Aquacrop a surestimé le couvert végétal du Chou conduit sous différents régimes d'irrigation. Nikolaus (2013) a également noté une surestimation légère (10 %) mais systématique de la quantité de biomasse de riz conduite sous différents niveaux d'irrigation et de fertilisation.

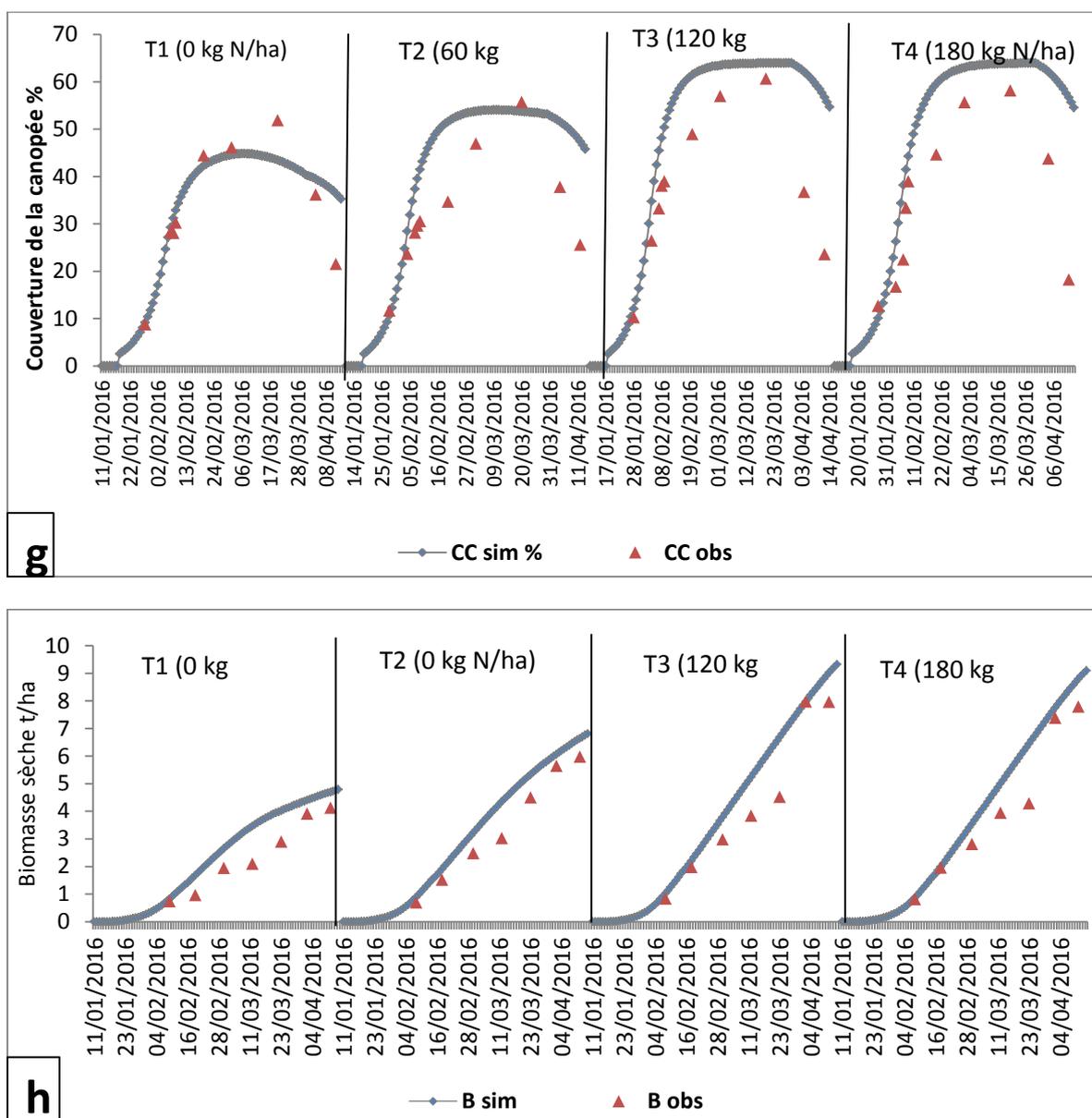


Figure 24. Couverture de la canopée (**g**) et la biomasse sèche (**h**) simulées et mesurées pour la période d'étalonnage (2015/2016) sous différents niveaux de fertilisation (T1, T2, T3 et T4)

7.3. Résultats de validation du modèle

Dans cette étude, la performance du modèle a été validée avec une simulation du rendement sec, de la biomasse sèche et de la couverture végétale. La validation a été réalisée avec des données pour les différents niveaux de fertilisation (0, 60, 120 et 180 kg N/ha) au cours de la saison de croissance (2016/2017). La comparaison de la biomasse aérienne sèche et la couverture de la canopée simulées et observées sont illustrées par la figure 25 et le tableau 8.

Tableau 8. Indicateurs de la qualité de l'ajustement dans l'estimation de la couverture du couvert et de la biomasse pour l'étalonnage du modèle en 2015-2016 et la validation en 2016-2017.

Indicateurs	CC (%)				Biomasse (t/ha)			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Calibration (2015/2016)								
R ²	0.81	0.71	0.66	0.64	0.92	0.98	0.94	0.94
NRMSE	18.0	35.5	41.4	46.3	34.5	21.6	25.6	25
EF	0.79	0.03	-0.13	-0.06	0.55	0.85	0.82	0.82
d	0.94	0.81	0.78	0.80	0.91	0.96	0.96	0.96
Validation (2016/2017)								
R ²	0.81	0.98	0.94	0.98	0.94	0.98	0.98	0.98
NRMSE	15.8	5.9	23.8	25.7	24.7	16.40	14.8	12.50
EF	0.87	0.98	0.68	0.63	0.87	0.94	0.96	0.97
d	0.99	1	0.94	0.93	0.97	0.98	0.99	0.99

La biomasse aérienne sèche observée varie de 5,252 à 9,787 t/ha, tandis que le rendement observé fluctue entre 4,253 et 9,199 t/ha pour les traitements compris entre T1 (0 kg N/ha) et T4 (180 kg N/ha).

Les paramètres indicatifs de la qualité d'ajustement pour la saison de validation du modèle pour la CC et B, sont respectivement, $0,81 < R^2 > 0,98$ et $0,94 < R^2 > 0,98$; $5,9 < nRMSE > 25,7$ et $12,5 < nRMSE > 24,7$; $0,63 < EF > 0,87$ et $0,87 < EF > 0,97$ et $0,97 < d > 0,99$ et $0,93 < d > 1$.

Le modèle AquaCrop a montré des performances acceptables lors de la validation. De manière similaire aux résultats d'étalonnage, les estimations de la couverture de la canopée et de la biomasse aérienne sèche dépassaient quelque peu, mais systématiquement, les valeurs observées; Il en résulte des différences de 8,39 à 8,54% et de 1,47 à 6,29%, respectivement, entre les différents niveaux de fertilisation.

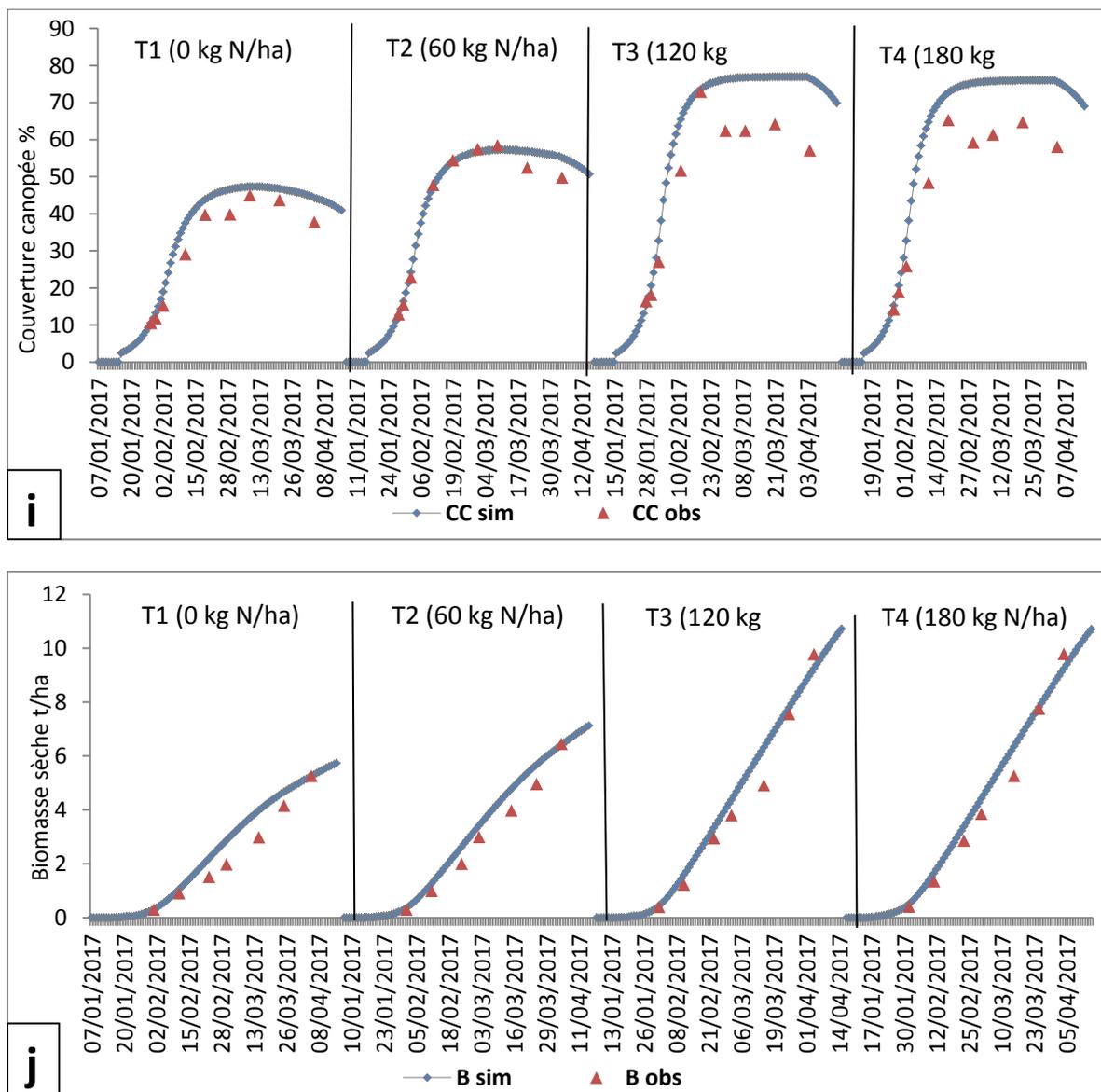


Figure 25. Couverture de la canopée (i) et la biomasse sèche (j) simulées et mesurées pour la période de validation (2016/2017) sous différents niveaux de fertilisation (T1, T2, T3 et T4)

7.4. Rendements

Les rendements observés et simulés de la laitue sont illustrés par la figure 26. Les rendements observés pour les traitements T1, T2, T3 et T4 sont respectivement, 4,021 ; 5,234 ; 7,834 et 7,626 t/ha, tandis que ceux simulés sont de l'ordre de 4,546 ; 5,785 ; 8,854 et 8,645 pour la période d'étalonnage (2015/2016), avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,99$. Par contre les rendements observés et simulés sous les quatre traitements pour la période de validation (2016/2017) sont de l'ordre de 4,253 ; 5,371 ; 9,045 et 9,199 t/ha ; 4,873 ; 6,768 ; 10,173 et 10,164 t/ha, respectivement avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,98$. Cet indicateur statistique indique que les valeurs simulées par le modèle Aquacrop sont en bon accord avec celles observées. Araya et al. (2010) ont signalé des valeurs de R^2

> 0,80 lors de la simulation de la biomasse aérienne et du rendement en grains d'orge à l'aide d'AquaCrop. Maniruzzamana et *al.* (2015), ont montré que des valeurs de $0,94 < R^2 < 0,99$ lors de la simulation du rendement de riz sous différents régimes d'irrigations au Bangladash.

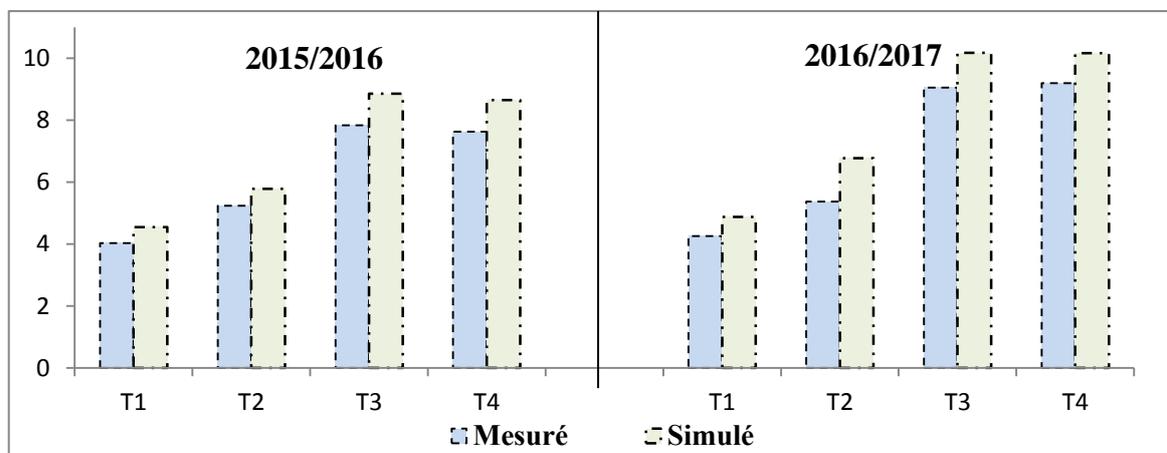


Figure 26. Rendements simulés et observés de la laitue sous différents niveaux de fertilisation

7.5. Productivité de l'eau (WP)

La figure 27 montre, la variation de la productivité de l'eau (WP), de l'évaporation du sol (Es) et de la transpiration (Tr) de la laitue sous différents niveaux de fertilisation. Cette variation est appuyée par l'analyse de la variance, qui a montré, un effet très hautement significatif ($p < 0,001$), de ces paramètres (WP, Es et Tr), en relation avec l'augmentation des doses d'azotes apportées. Les valeurs maximales de WP et de la Tr sont atteintes à la dose de 120 kg N/ha, pour les deux campagnes 2015/2016 (WP = 9,57 kg/m³; Tr = 55,8 mm) et 2016/2017 (13,91 kg/m³; Tr = 52,40 mm). Au-dessus de ce niveau, l'augmentation du taux d'azote est non significative.

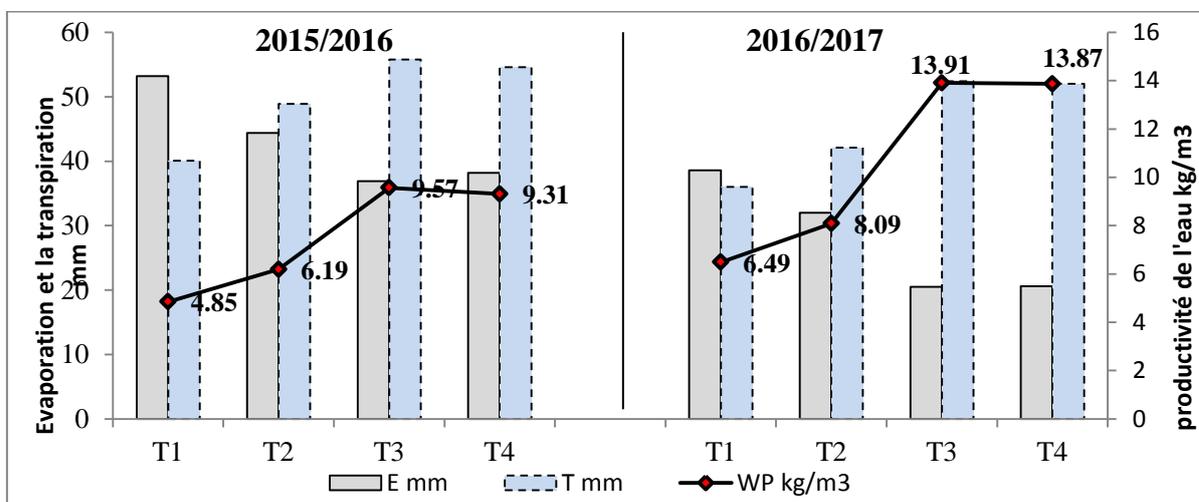


Figure 27. Variation de la productivité de l'eau de la laitue sous différents niveaux de fertilisation.

Le tableau 9 montre l'effet de différents niveaux de fertilité sur la réduction de CCx, CGC et la WP*.

Il est constaté qu'allant de Traitement T1 (0 kg N/ha) jusque au Traitement T3 (120 kg N/ha), la réduction de ces paramètres (CCx, CGC et WP*) est diminuée significativement. Pour le traitement T3 où le stress de fertilité est à 0 % n'affecte plus, la couverture de la canopée et la production de la biomasse, pour cela la réduction de la WP* est de 0 %. Tans dit que le traitement T4 (180 kg N/ha), influence négativement l'expansion de la canopée et de la biomasse, et pour cela la réduction de la WP* pour les deux saisons d'expérimentations est de 2% et 10 %, respectivement. Cette observation est signalée par Maurice *et al.* (1985) qui ont montré qu'une fertilisation azotée à des doses élevées (qui excède les besoins de croissance potentielle de la plante) entraîne une baisse de production de la biomasse due à la toxicité à l'ion ammonium.

Tableau 9. L'effet de stress de fertilité du sol sur la productivité de l'eau et sur le développement de la couverture de la canopée

	Traitements	Réduction de la Couverture maximale CCx (%)	Réduction de CGC (%)	Déclin moyen de la couverture (%/jour)	Réduction de la WP* (%)
2015/2016	T1 (0 kg N/ha)	46	28	0.44	48
	T2 (60 kg N/ha)	30	18	0.17	30
	T3 (120 kg N/ha)	0	0	0	0
	T4 (180 kg N/ha)	2	2	0.2	2
2016/2017	T1 (0 kg N/ha)	46	28	0.33	40
	T2 (60 kg N/ha)	35	21	0.10	26
	T3 (120 kg N/ha)	0	0	0	0
	T4 (180 kg N/ha)	10	6	0.02	10

8. Analyse isotopique

8.1. Signature isotopique de l'eau du sol, de pluie et de la tige

La figure 28 montre la variation de la composition isotopique de l'eau dans le système sol-plante.

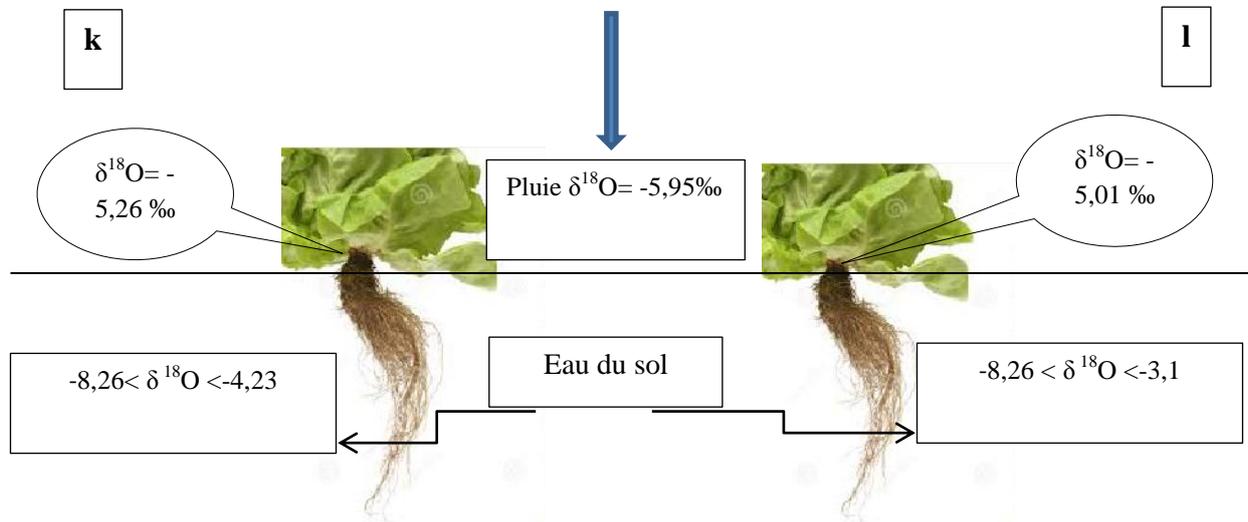


Figure 28. Effet de la pluie sur les signatures isotopiques dans le système sol-plante : (k) après une pluie ; (l) avant une pluie.

L'eau qui circule dans les tiges correspond bien à celle qui est prélevée à une certaine profondeur dans le sol, pour cela, la composition isotopique de l'eau de la tige permet de définir la profondeur à laquelle l'eau est extraite par les racines dans le sol. Lin et Sternberg (1994); Yakir et Sternberg (2000) et Wang et *al.* (2010) ont signalé que les profondeurs de l'absorption d'eau par les racines sont déduites à des profondeurs où les compositions isotopiques de l'eau de la tige et de l'eau du sol sont identiques.

La composition isotopique moyenne de la tige est de l'ordre de $-5,22\text{ ‰}$ ($SD = 0,20$). Elle est proche de celle de l'eau du sol ($-5,93\text{ ‰}$) à une profondeur de -10 cm . Cela laisse supposer que les niveaux de surface ne participent pratiquement pas à l'alimentation hydrique de la plante. Cette hypothèse est confirmée par le fait que, d'une part, les niveaux superficiels présentent les humidités volumiques les plus faibles, et d'autre part, que les racines sont en général peu développées dans les premiers centimètres du sol. Cette observation confirme celle de plusieurs chercheurs, Zimmerman et *al.* (1967), Boujamlaoui et *al.* (2005) et Wang et *al.* (2010) ayant montré l'absence de fractionnement isotopique au cours de l'absorption racinaire.

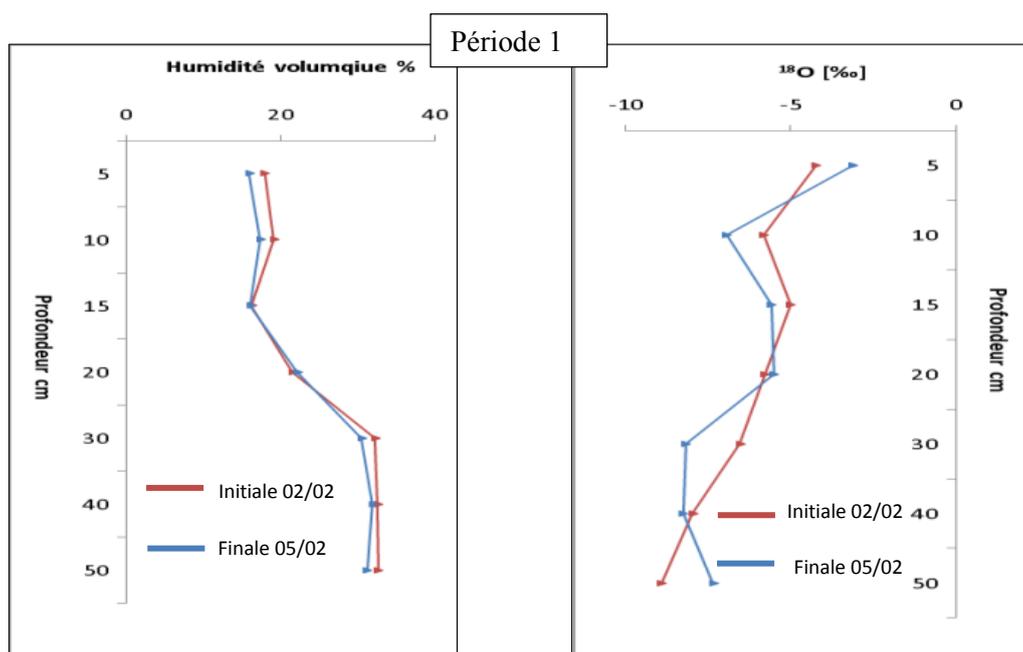
8.2. Bilan hydrique et les profils isotopiques

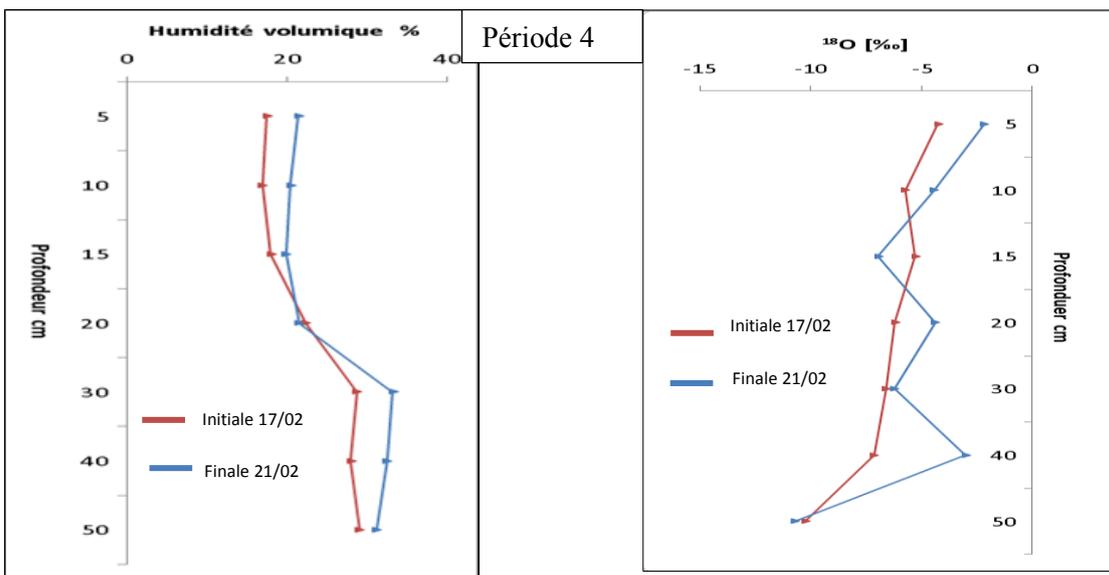
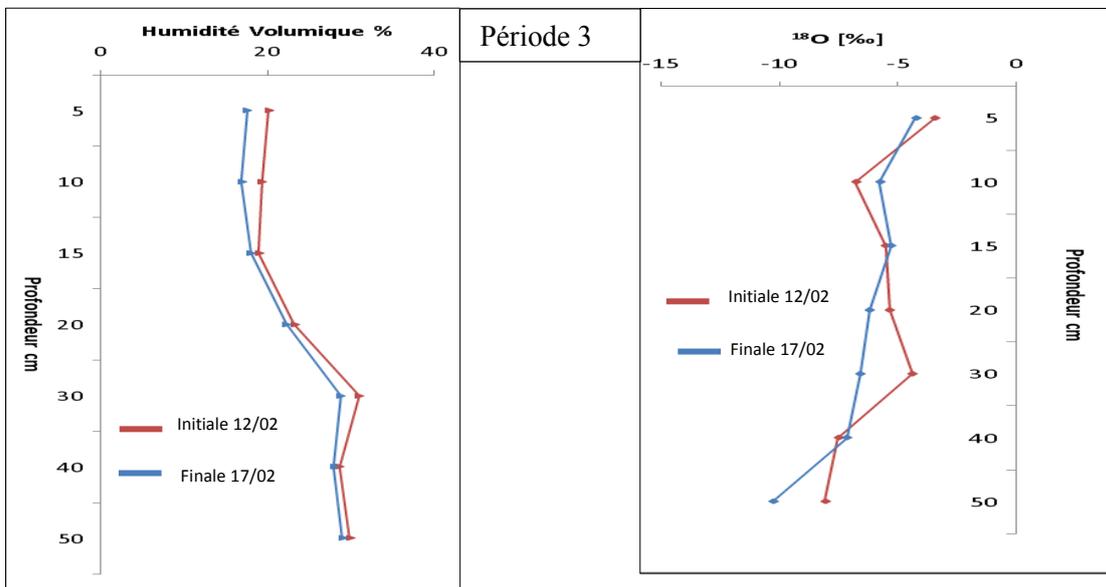
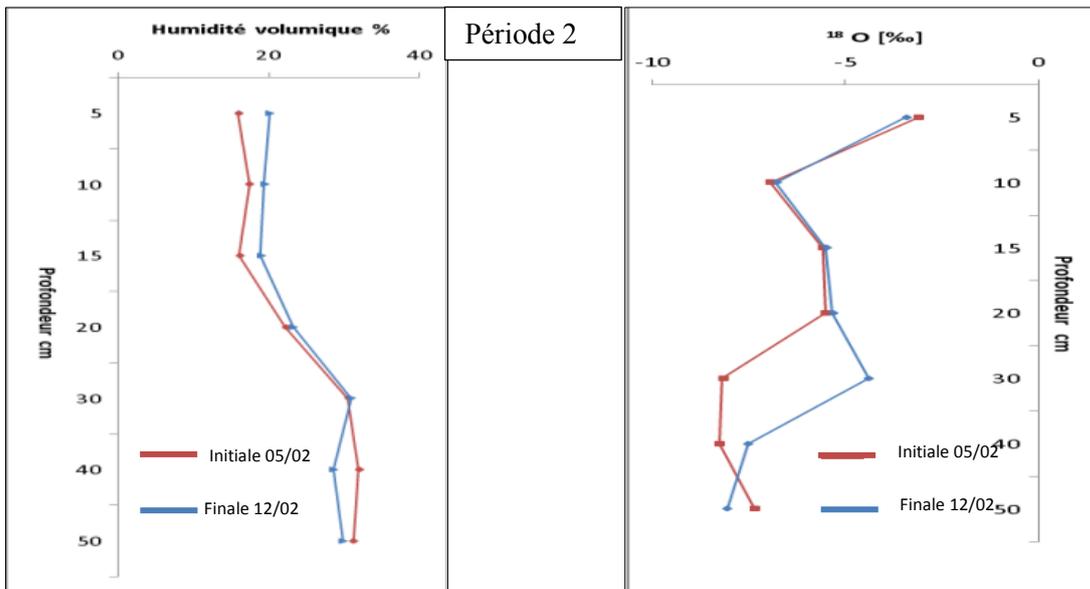
La figure 29 montre les 7 périodes d'observations effectuées sur la micro-parcelle fertilisée par la dose 120 kg N/ha au cours de la saison de culture 2016/2017. La période la plus courte est de 4 jours (période 3) et la plus longue est de l'ordre de 23 jours (période 4). La première période d'observation a débuté après la phase d'émergence (02/02/2017). Au cours de ces périodes d'observations, l'enrichissement maximum d'isotopes stables s'est produit dans la couche supérieure de sol, à une profondeur de (-5 cm), les valeurs d'isotopes stables varient de -4,67 à -2,18 ‰. Au-dessous de la profondeur (-5 cm), les valeurs isotopiques n'ont pas changé de manière significative, se situant dans une plage allant de -5,82 à -10,73 ‰. Cet enrichissement isotopique enregistré à la surface du sol est caractéristique de l'évaporation.

L'analyse isotopique de l'eau des profils hydriques et de l'eau de la tige permet de déduire la profondeur d'absorption de l'eau par les racines (0-30 cm) et la profondeur d'évaporation, c'est le front d'évaporation, qui a été détecté à une profondeur de (-5 cm).

Allison *et al.* (1983) et Barnes et Allison (1988) dans leur travaux de recherche, ont également signalé qu'un enrichissement maximal des isotopes stables est observé avec une profondeur d'environ 5 cm.

La teneur en eau volumétrique augmente avec la profondeur, tandis que les valeurs d'isotope stable de l'eau du sol diminuent avec la profondeur dans le profil du sol. Cette tendance correspond à celle prédite par les modèles théoriques (Zimmerman *et al.*, 1967; Allison et Barnes, 1983; Shurbaji *et al.*, 1995).





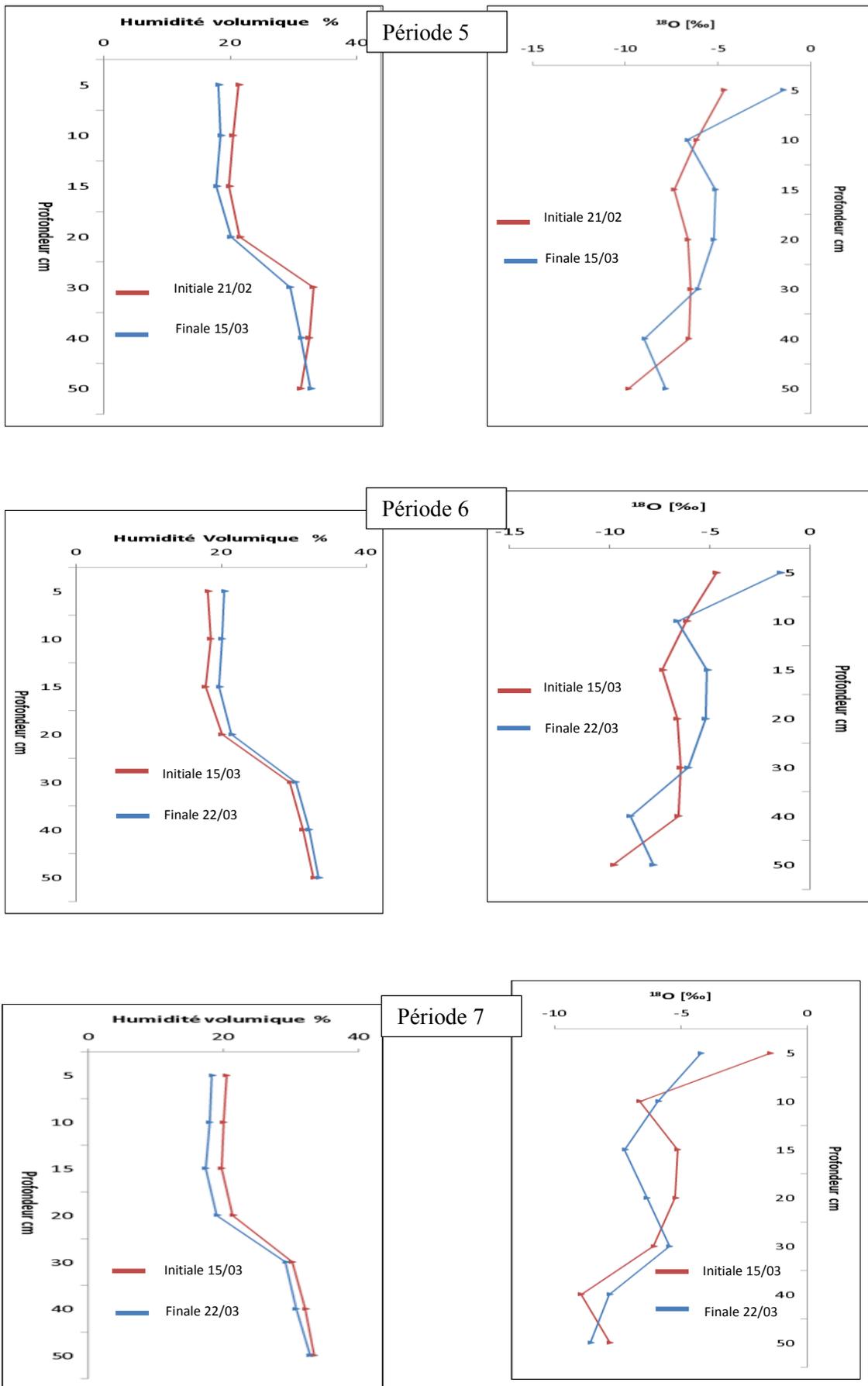


Figure 29. Les profils hydriques et isotopiques (^{18}O)

8.3. Estimation de l'évaporation et de la transpiration par la méthode isotopique (IMB)

Le tableau 10 montre les quantités d'eau transpirées et évaporées au cours des périodes d'observations. Il est constaté que le taux d'évaporation a varié entre 0,09 et 0,44 mm/j, dont la valeur maximale a été calculée pour la période n° 1. Le taux élevé d'évaporation au cours de cette période (n° 1) est attribué par deux raisons : premièrement, le premier échantillonnage a été effectué après une forte pluie tombée (135 mm) en janvier 2017. C'est-à-dire que le sol était bien mouillé. Deuxièmement, les plants de la laitue n'étaient pas encore développés, il n'y avait donc pas de feuilles recouvrant complètement le sol. Tandis que le taux de la transpiration a varié de 0,43 à 1,70 mm/j, sauf pour la période 4, la valeur de la quantité transpirée est négative. En général, le taux de la transpiration a été plus élevé pendant les périodes qui incluent un événement de pluie. Cependant, des valeurs négatives pour les taux de transpiration ont été mentionnées dans les études de Hsieh et *al.* (1998) et Robertson et Gazis (2006). Les auteurs ont expliqué que la teneur finale en eau était supérieure à la somme de la teneur initiale en eau et de la quantité de pluie. Selon Hsieh et *al.* (1998), l'utilisation de la méthode isotopique (IMB) donne des valeurs négatives en raison de l'incapacité d'observer une recharge fréquente à partir de la zone d'étude pendant la saison des fortes pluies. En outre, certaines erreurs et incertitudes mineures de l'analyseur isotopique lui-même peuvent conduire à des taux de transpiration faibles estimés et, par conséquent, à un bilan de masse isotopique négatif.

Tableau 10. Résultats de calcul l'évaporation et la transpiration par la méthode isotopique (IMB)

Période	Dates	Duration (jours)	Les apports d'eau pluie [mm]			Signature isotopique [‰]					Fraction de l'eau					Evaporation		Transpiration	
			m_i	m_p	m_f	δ_i	δ_p	δ_f	δ_e	δ_t	X_i	X_p	X_f	X_e	X_t	ΣE [mm]	E (mm/j)	ΣT [mm]	T (mm/j)
1	02/02 à 05/02	4	135.09		129.29	-8.46		-8.21	-17.54	-8.33	1.00		0.96	0.0030	0.0278	1.74	0.44	4.77	1.19
2	05/02 à 12/02	8	129.28	8	130.29	-8.19	-5.64	-7.89	-17.23	-8.04	0.94	0.06	0.95	0.0155	0.0376	2.13	0.27	5.17	0.65
3	12/02 à 17/02	6	130.29		123.06	-7.89		-7.83	-17.11	-7.83	1.00		0.94	0.0061	0.0494	-0.52	-0.09	9.75	1.62
4	17/02 à 21/02	3	123.06	4	131.53	-7.97	-5.62	-7.93	-17.22	-7.93	0.97	0.03	1.04	0.0050	-0.0402	0.64	0.21	-5.10	-1.70
5	21/02 à 15/03	23	131.53		125.96	-7.88		-7.68	-16.82	-7.68	0.95		0.91	0.0199	0.0709	2.76	0.12	9.82	0.43
6	15/03 à 22/03	8	125.96	12	136.77	-7.48	-5.72	-7.38	-16.62	-7.38	0.88	0.08	0.96	0.0104	0.0329	1.48	0.19	4.71	0.59
7	22/03 à 28/03	7	136.77		133.43	-7.28		-7.24	-16.53	-7.24	1.00		0.98	0.0047	0.0197	0.65	0.09	3.70	0.53

8.4. L'évapotranspiration estimée par le modèle AquaCrop et IMB

La figure 30 montre les résultats de calcul séparément le taux d'évaporation et de la transpiration pendant les périodes d'observations. D'après cette figure, il est constaté que l'évaporation estimée par les deux méthodes (IMB et AquaCrop) a augmenté pendant la phase initiale du développement de la laitue, s'est stabilisée au milieu de la période de croissance, et a diminué à la fin de la période de croissance. Pendant toute la période d'observation (n° 5), le taux maximum de ET estimé par le modèle AquaCrop et IMB est de l'ordre de 18,6 mm et 12,58 mm (21/02 à 15/03/2017), respectivement. Tandis que les valeurs correspondantes pour l'évaporation (E) sont de l'ordre de 3,0 mm et 2,76 mm.

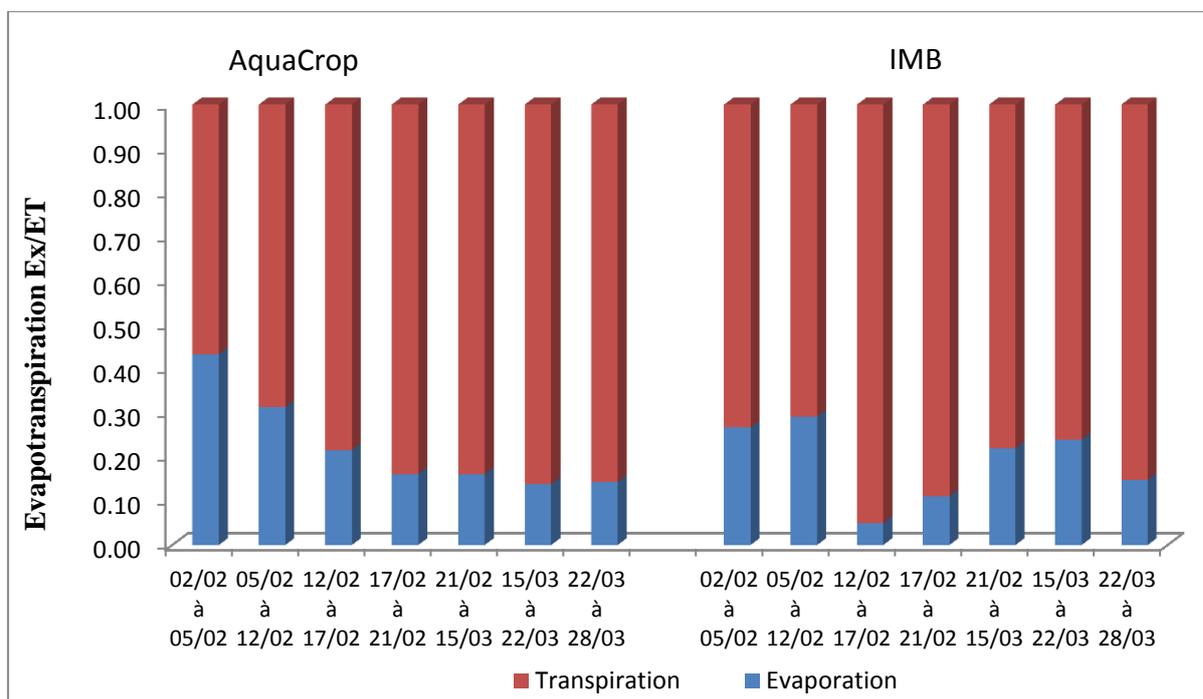


Figure 30. La contribution de l'évaporation et de la transpiration estimée par le modèle Aquacrop et la méthode isotopique (IMB) durant toute la période d'observation (02/02 à 28/03/2017)

Une bonne corrélation ($r = 0,76$) a été obtenue entre l'ET mesurée par (IMB) et celle simulé par le modèle AquaCrop (figure 31). Heng et al. (2014) ont comparé l'ET mesurée par les méthodes conventionnelles (Eddy covariance et micro lysimètre) et la technique isotopique (Keeling plot) et l'ET simulée par le modèle AquaCrop dans la plaine du Nord de la Chine. Ils ont montré qu'un accord significatif entre le rapport E/ET estimé par la technique isotopique et les méthodes classiques ($R^2 = 0,8468$, $n=27$). Ainsi, une bonne corrélation ($R^2 = 0.83$) a été obtenue entre ET mesurée (isotopique) et simulé (AquaCrop).

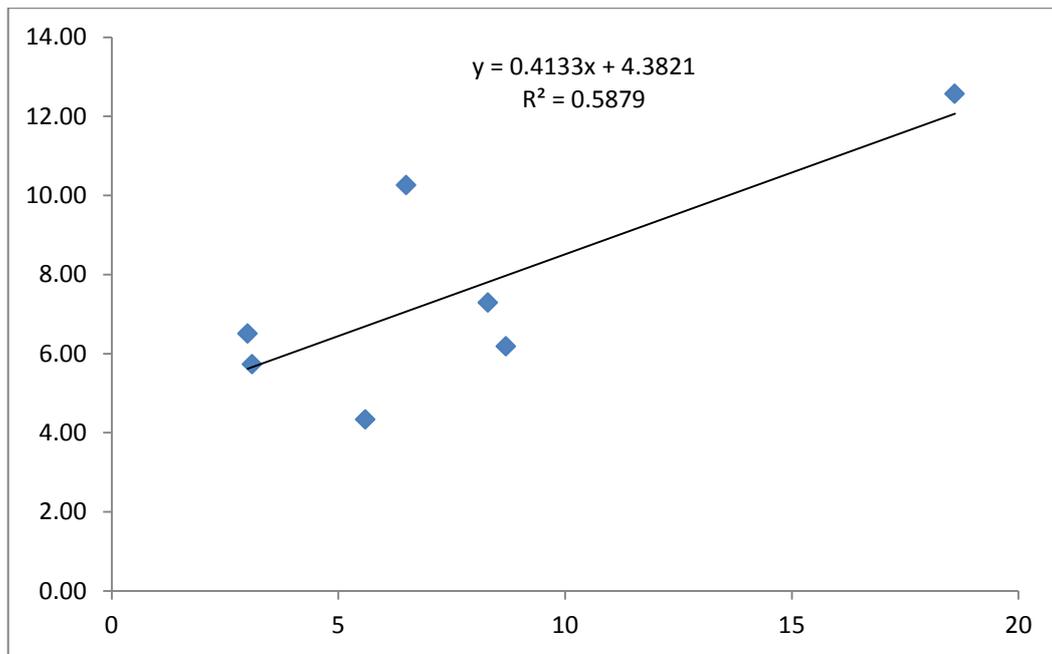


Figure 31. Relation entre l'évapotranspiration mesurée (IMB) et simulée (Aquacrop)

La contribution de la transpiration à l'évapotranspiration réelle est de 81,00 et 79,93 %, pour la méthode isotopique (IMB) et le modèle Aquacrop, respectivement. Plusieurs études (Herbst et coll., 1996; Ferretti et coll., 2003; Yopez et coll., 2003; Robertson et Gazis, 2006; Roupsard et coll., 2006; Xu et coll., 2008; Wang et coll., 2010; Wenninger et *al.*, 2010; Zhang et *al.*, 2011), y compris le modèle de culture de la FAO, ont montré que le pourcentage de la transpiration résultant de l'évaporation totale est d'environ 70%.

Conclusion générale

L'efficacité de l'utilisation de l'eau et des engrais azotés en agriculture, cas de la laitue, sont avérés à travers les résultats obtenus par les techniques isotopiques (^{15}N et O^{18}), appuyés par ceux obtenus, par la simulation du modèle AquaCrop. Les résultats sont prometteurs et comparables.

Les techniques isotopiques et/ou la modélisation, contribuent à estimer avec précision, les différentes sources d'azotes assimilées par la culture, en liaison avec la productivité de l'eau.

Il est important de souligner que la fertilisation azotée, permet un bon développement de la culture, à partir de la dose minimale de 60 kg N/ha. Le taux d'engrais azoté, influence significativement, l'évolution de la biomasse aérienne et le rendement de la laitue. La dose de 120 kg N/ha peut aboutir à un rendement de l'ordre de 54,25 t/ha, par rapport aux autres doses apportées, avec une efficacité d'utilisation d'azote de l'ordre de 74,48 %. Cette valeur est recommandée comme la dose efficace pour la culture ainsi, que celles qui ont les mêmes caractéristiques morphologiques et qui évoluent sous un même type de climat et de sol.

Le partitionnement de l'évapotranspiration, devrait être mesuré davantage, en liaison avec des ressources en eau de plus en plus limitées, combinés à la pression démographique en croissance, continue. La partition de l'ET peut être utilisée pour séparer les flux productifs (transpiration) et non productifs (évaporation); d'une part, pour une meilleure évaluation des pertes et des quantités d'eaux utilisées, nécessaires pour la transpiration des plantes; d'autre part, pour pouvoir établir des scénarios climatiques pour une amélioration des pratiques de gestion de l'eau agricole.

Les résultats expérimentaux obtenus sur le site d'étude ont été utilisés pour valider le modèle AquaCrop afin d'améliorer les pratiques agricoles. La capacité du modèle AquaCrop pour simuler la teneur en eau du sol, la couverture de la canopée et le rendement de laitue, ont été évaluées sous différents niveaux de fertilisation. Les paramètres conservateurs requis, ont été déterminés, et les résultats statistiques, sont appréciables. Les fonctions de stress peuvent être revues dans le cas où le modèle est répliqué dans d'autres régions agricoles. Un intérêt particulier, est le fait que le modèle requiert un nombre relativement restreint de données d'entrées explicites. Les résultats obtenus montrent que le modèle AquaCrop pourrait être recommandé comme un outil pratique pour mieux gérer les pratiques agricoles notamment, l'irrigation et la fertilisation. Par conséquent, permettra aux agents de vulgarisation locaux d'évaluer la productivité de l'eau et le rendement des cultures.

Références bibliographiques

- Adeboye O.B., Osunbitan J.A., Adekalu K.O. and Okunade D.A., 2009. Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and temperature based models in estimating reference evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73(4), 265-283.
- Allen R.G., Pereira, L.S., Howell T. and Jensen M., 2011. Evapotranspiration information reporting: Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98 (6), 899-920.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes, D., et Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage, Paper No. 56*, FAO, Rome, Italy, 300p.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., et Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage, Paper No. 56*, FAO, Rome, Italy, 300p.
- Allison G.B., Barnes, C.J. and Hughes, M.W., 1983. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soil. *Experimental Journal of Hydrology*, 64, 377–397.
- Amenzou N., Marah H., Raibi F., Ezzahar J., Khabba S., Lionel J. and Ismaili M., 2003. Estimation of soil evaporation and infiltration losses using stable isotopes, Fluxmeter and Eddy-Covariance system for citrus orchards in a semi-arid region (Morocco). *Academia Journal of Environmental Sciences*, 1(1): 001-008.
- Andarzian B., Bannayan M., Steduto P., Mazraeh H., Barati M. E., Barati, M. A. and 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.
- Aouade G., 2012. La partition de l'évapotranspiration en évaporation du sol et transpiration de la végétation dans le continuum « Sol-Plante-Atmosphère » pour une culture de blé dans la région du Haouz : Techniques isotopiques et modélisation. Master en Eau et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques Marrakech (Maroc), 118 p.
- Araya A., Habtu S., Hadgu K. M., Kebede A. and Dejene, T., 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97: 1838–1846.
- Araya A., Solomon H., Kiros M.H., Afewerk K., Taddese D., 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97: 1838–1846.
- Awaad M. S., Ali Badr R., Ali Badr, M. and Abd-elrahma, A.H., 2016. Effects of different nitrogen and potassium sources on lettuce (*Lactuca sativa* L.) yield in a sandy soil. *Eurasian Journal Soil Science*, 5: 299–306.
- Barnes, C. J. and Allison, G.B., 1983. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils: 1.Theory. *Journal of Hydrology*, 60: 141-156.
- Basso B. and Ritchie J.T., 2005. Impact of animal manure, compost and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield in a six-year maize alfalfa rotation. *Agriculture Ecosystems Environment*, 108: 329-341.

- Basso B. et al., 2009. Landscape position and precipitation effects on spatial variability of wheat yield and grain protein in Southern Italy. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195: 301-312.
- Bedard-Haughn A., Van Groeningen J.W., Van Kessel C., 2013. Tracing ¹⁵N through landscapes: potential uses and precautions. *Journal of Hydrology*, 272: 175–190.
- Begoña B. , Juan J. R., Luis M. C., Eva S. R., María M. R., Miguel A. R., Luis R. and Juan M. R., 2011. Iodine application affects nitrogen-use efficiency of lettuce plants (*Lactuca sativa* L.), *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science*, 61 (4): 378-383
- Boukhalfa-Deraoui N., Hanifi-Mekliche L. et Mekliche A., 2011. Effet d'un apport de phosphore sur une culture de blé tendre conduite en conditions irriguées. *Revue des BioRessources*, 1(1) 39-46.
- Belhouchette H., 2004. Evaluation de la durabilité de successions culturales à l'échelle d'un périmètre irrigué en Tunisie : utilisation conjointe d'un modèle de culture (CropSyst), d'un SIG et d'un modèle bio-économique. Thèse de doctorat en science du sol : ENSAM Montpellier, 155p.
- Benblidia, 2012. In, Semiani M. Efficience d'utilisation de l'eau et des intrants. [juillet 2017], INRAA, 20p
- Boote K.J., Jones, J.W., Hoogenboom, G. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.) *Agricultural systems modeling and simulation*. New York: Marcel Dekker, 651-691
- Boroujerdnia M., Alemzadeh A.N. and Farideh S.D., 2007. Effect of cultivars, harvesting time and level of nitrogen fertilizer on nitrate and nitrite content, yield in romaine lettuce. *Asian Journal of Plant Sciences*, 6 : 550–553.
- Boujamlaoui Z., Bariac, T., Biron P., Canale L. and Richard P., 2005. Profondeur d'extraction racinaire et signature isotopique de l'eau prélevée par les racines des couverts végétaux. *C. R. Geosciences*. 337: 589-598.
- Brisson N., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.
- Brisson N., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.*, 18: 309-332.
- Brisson N., Launay M., Mary B. and Beaudoin N., eds, 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Versailles, France: Éditions Quæ.
- Brisson N., Launay M., Mary B. and Beaudoin N., 2009. Conceptual basis, formalizations and Parameterization of the STICS crop model. Versailles; Quæ.

- Brunel J.P., Walker G.R., Dighton J.C., Monteny B., 1997. Use of stable isotopes of water to determine the origin of water used by the vegetation and to partition evapotranspiration. A case study from HAPEX-Sahel. *Journal of Hydrology*, 188-189, 466-481.
- Campbell, G. S., and Norman, J. M., 1989. The description and measurement of plant canopy structure. In G. Russell, B. Marshall, & P. G. Jarvis (Eds.), *Plant Canopies: their Growth, Form and Function*: Cambridge University Press.
- Chalayer P., Gouze M. et Lizot J.F., 1998. Les salades d'automne-hiver sous abri froid, conduite en agriculture biologique, Laitue – Batavia - Feuilles de chêne - Lollo. Fiche Tec. GRAB-ITAB, 4p.
- Collin F, Lizot J.F., 2003. Produire des semences de laitue dans un itinéraire agrobiologique. Fiche Tec. ITAB (Institut Technique de l'Agriculture Biologique), 4p.
- Dagnelie P., 2003. Principes d'expérimentations : planification des expériences et analyse de leurs résultats. Gembloux : Presses agronomiques. 397p.
- De Wit A.J.W. and Van Diepen C.A., 2007. Crop model data assimilation with the Ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts. *Agric. For. Meteorol.*, 146, 38-56.
- Djaman K., Balde A.B., Sow A., Muller B., Irmak S., Ndiaye M.K., Manneh B., Moukoumbi Y.D., Fatakuchi K. et Saito K., 2015. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3: 139-159.
- Doorenbos J. and Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper 33*. FAO, Rome, Italy, 193 pp.
- Dubbert M., Cuntz M., Piayda A., Maguas C., Werner C., 2013. Partitioning evapotranspiration – testing the Craig and Gordon model with field measurements of oxygen isotope ratios of evaporative fluxes. *J. Hydrol.* 496: 142–153.
- Dubbert, M., Piayda, A., Cuntz, M., Correia, A.C., Silva, F.C.E., Pereira, J.S., Werner, C., 2014. Stable oxygen isotope and flux partitioning demonstrates understory of an oak savanna contributes up to half of ecosystem carbon and water exchange. *Frontiers in Plant Science*, 5: 530-540.
- Edith T., Lammerts V.B., Paul C.S., 2017. Diverse concepts of breeding for nitrogen use efficiency. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37: 50
- El garouni A., 1995. Estimation et cartographie de l'évapotranspiration réelle par télédétection et systèmes d'Information Géographiques" : contribution à l'étude hydrogéologique de la basse vallée de la Medjerda. Thèse du 3ème cycle- Faculté des sciences de Tunis.150 p.
- Er-raki S., 2007. Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, expérimentation et télédétection, Thèse de doctorat en Mécanique des Fluides et Energétique -Télédétection, Faculté des Sciences Marrakech, 112 p.

- FAO, 2011. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Managing systems at risk. *Synthesis Report*, Rome: FAO.
- FAO, 2019. *Statistical database*. <http://www.fao.org/faostat/fr/#compare>
- FAO, 2005. Utilisation des engrais par culture en Algérie. 56p
- FAO, 2003. *Statistical database*. <http://apps.fao.org/page/collections?subset=agriculture>
- Farahani H.J., Izzi G., Oweis T.Y., 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 101: 469–476.
- Ferretti D.F., Pendall E., Morgan J.A., Nelson J.A., LeCain D., Mosier A.R., 2003. Partitioning evapotranspiration fluxes from a Colorado grassland using stable isotopes: seasonal variations and ecosystem implications of elevated atmospheric CO₂. *Plant Soil*, 254 (2): 291–303.
- Ge L.K., Heng K., Sakadevan G., Dercon M.L., 2014. Nguyen (eds), Proceedings - International Symposium on Managing Soils for Food Security and Climate Change Adaptation and Mitigation. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 263–268.
- Geerts S., Raes D., 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agriculture Water Management*, 96: 1275–1284.
- Gonzalez M.Q., 2017. Compositional diagnosis of nitrogen nutrition of lettuce and onion in organic soils. Doctoral thesis, University Laval, Quebec, Canada, 115 pp.
- GREN, 2014. Regional reference framework for the implementation of the nitrogen fertilization balance in Ile de France, 62 pp.
- Haffaf H., Benkherbache N., Benniou R. et Saoudi M., 2016. Étude de la fertilisation azotée appliquée pour la production de semences du blé dur *Triticum durum* (variété waha) en zone semi-aride (M'sila). *Revue Agriculture*, Numéro spécial 1, 272-277
- Halilat M. T., 2004. Effect of Potash and Nitrogen Fertilization on Wheat under Saharan Conditions. IPI regional workshop on Potassium and Fertigation development in West Asia and North Africa ; Rabat, Morocco, 24-28 November 2004.
- Hansen S., Jensen H. E., Nielsen N.E. and Swenden H., 1990. Daisy, a soil plant system model. Danish simulation model for transformation and transport of energy and matter in the soil plant atmosphere system. Copenhagen: The National Agency for Environment Protection.
- Harmsen K., Moraghan J. T., 1988. A comparison of the isotope recovery and difference methods for determining nitrogen fertilizer efficiency. *Plant and Soil*, 105: 55-67.
- Hbaeib H., et Chiraz M., 2003. Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées au nord de la Tunisie : estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques (cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte). *Revue Sécheresse*. Volume 14, Numéro 4, 257- 265.
- Heng, L.K., Evett, S.R., Howell, T.A., Hsiao, T.C., 2009. Calibration and testing of FAO Aquacrop model for maize in several locations. *Agronomy Journal*, 101: 488-498

- Herbst M., Kappen L., Thamm F., and Vanselow, R., 1996. Simultaneous measurements of transpiration, soil evaporation and total evaporation in a maize field in northern Germany, *Journal of Experimental Botany*, 47: 1957–1962
- Heydari M. M., Aghamajidi R., Beygipoor G.H. and Heydari M., 2014. Comparison and evaluation of 38 equations for estimating reference evapotranspiration in an arid region. *Fresenius Environmental Bulletin*, 23(8): 1985-1996.
- Hsiao T. C., Heng L., Steduto P., Rojas-Lara B., Raes D., Fereres E., 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101 (3): 448–459.
- Hu Z. M., Wen X. F., Sun X. M., Li L. H., Yu G. R., Lee X. H., Li S. G., 2014. Partitioning of evapotranspiration through oxygen isotopic measurements of water pools and fluxes in a temperate grassland. *Journal of Geophysical Research*, 119 (3): 358–371.
- INSID, 2009. Note de synthèse sur les actions réalisées par institut national des sols de l'irrigation et du drainage dans le cadre de la fertilisation. 16p.
- IAEA, 2001. Use of Isotope and Radiation Methods in Soil and Water Management and Crop Nutrition. Manual. Training Course Series No. 14., Vienna, Austria.
- Jia X., Scherer T. H., Lin D., Zhang X. et Refal I., 2013. Comparison of reference evapotranspiration calculations for southeastern North Dakota. *Irrigation and Drainage Systems Engineering*, 2(3): 1-9.
- Jones C.A. and Kiniry J.R., 1986. CERES-Maize, a simulation model of maize growth and development. College Station, TX, USA: Texas A&M University Press.
- Kchaou R., Khelil M. N., Gharbi F., Rejeb S., Rejeb M. N., Henchi, B. and Destain, J. P. 2011. Efficiency of use of nitrogen from Residual Sludge by Sorghum Feed. *European Journal of Scientific Research*, 54: 75–83
- Khelil M.N., Rejeb S., Henchi B. and Destain, J.P. 2005. Effect of fertilizer rate and water irrigation quality on the recovery of ^{15}N -labeled fertilizer applied to Sudangrass. *Agronomy for Sustainable Development*, 25: 137–143.
- Krause P., Boyle D.P., Bäse F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 89-97.
- Lai C.T., Ehleringer J.R., Bond B.J., Paw K.T., 2006. Contributions of evaporation, isotopic non-steady state transpiration and atmospheric mixing on the ^{18}O of water vapour in Pacific Northwest coniferous forests. *Plant Cell Environment*, 29 (1) : 77–94
- Lakhdari K., Kherfi Y. et Boulassel A., 2010. Atlas des semences locales ou acclimatées dans les oasis de l'Oued Righ. CRSTRA (Centre de Recherche Scientifique et Technique des Régions Arides), 78p.
- Lawlor D.W., Lemaire G. and Gastal, F., 2001. Nitrogen, plant growth and crop yield. *Plant Nitrogen*, 343–367.
- Lin G., Sternberg L.d.S.L., 1994. Utilization of surface water by red mangrove (*Rhizophora mangle*l.): an isotope study. *Bulletin of Marine Science* 54, 94–102.

- MADR, 2015. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. Série B, Statistiques Agricoles.
- Majoube M., 1971 - Fractionnement en oxygène-18 et en deutérium entre l'eau et sa vapeur. *Journal de Chimie Physique*, 68: 1423-1436.
- Maniruzzamana M., 2015. Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 159: 331-340.
- Martin S., Erwin S., Uwe A.S., 2011. CropRota – A crop rotation model to support integrated land use assessments. *European Journal Agronomy*, 34: 263–277.
- Marouani A., Sahli A. et Ben Jeddi F., 2013. Efficience d'utilisation de l'azote par la pomme de terre de saison (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Animal and Plant Sciences*, 18 (3) 2785-2801
- Maurice E.H., Robert F.B. and Darrel S.M., 1985. Forages, 413–421. In: *The Science of Grassland Agriculture*. (4thed.) Iowa State Univ. Press (Ames), Iowa, USA.
- Mazoyer M., 1970. Agriculture et développement en Algérie. Document photocopié. Centre Culturel Français d'Alger. 14p.
- Mjejra M., 2015. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique. Géographie. Thèse de doctorat, Université Rennes 2. France. 311p.
- Mkhabela M.S., Bullock P.R., 2012. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110: 16–24.
- Moreira M.Z., Sternberg L.D.L., Martinelli L.A., Victoria R.L., Barbosa E.M., Bonates L.C.M., Nepstad D.C., 1997. Contribution of transpiration to forest ambient vapour based on isotopic measurements. *Global Change Biology*, 3 (5): 439–450.
- Numbeo, 2019. Quel est le coût d'une salade entière en Algérie en 2019 ?
<https://www.combien-coute.net/salade/algerie/>
- Paredes P., Wei Z., Liu Y., Xu D., Xin Y., Zhang B., Pereira L.S., 2015. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 152 : 57–71.
- Piedallu C., 2012. Spatialisation du bilan hydrique des sols pour caractériser la distribution et la croissance des espèces forestières dans un contexte de changement climatique. Thèse, spécialité sciences forestières et du bois. Agroparistech, Nancy, France, p. 281.
- Poussin J. C., 1987. Notions de système et de modèle: note. *Cahiers des sciences humaines*, vol. 23, n 3-4, 439-441.
- Raes D., Paquale S. T., Hsiao C. and Fereres E., 2012. Contributions of the AquaCrop Network, Reference manual. FAO, Land and Water Division, Rome, Italy, 178p.

- Rana G., and Katerji N., 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*, 13: 125-153.
- Ritchie J.T. and Otter S., 1984. Description and performance of CERES-Wheat, a user oriented wheat yield model. Temple, TX, USA: USDA-ARS-SR Grassland Soil and Water Research Laboratory.
- Robertson J. A. and Gazis C. A., 2006. An oxygen isotope study of seasonal trends in soil water fluxes at two sites along a climate gradient in Washington State (USA), *Journal of Hydrology*, 328: 375–387.
- Roupsard O., Bonnefond J.M., Irvine M., Berbigier P., Nouvellon Y., Dauzat J., Taga S., Hamel O., Jourdan C., Saint André L., Mialet-Serra I., Labouisse J.P., Epron D., Joffre R., Braconnier S., Rouzière A., Navarro M., Bouillet J.P., 2006. Partitioning energy and evapo-transpiration above and below a tropical palm canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139 (3-4): 252-268.
- Ryan J., Nsarellah N. and Mergoum M., 1997. Nitrogen Fertilization of Durum Wheat Cultivars in the Rainfed Area of Morocco: Biomass, Yield and Quality Considerations. Akadémiai Kiadó. *Cereal Research Communications*, 25(1): 85-90
- Salemi H, Soom MAM, Lee TS, Mousavi SF, Ganji A, Yusoff MK (2011). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*. 610: 2204-2215.
- Saoudi M., Benkherbache N., Benniou R. et Haffaf H., 2016. Etude de la fertilisation azotée appliquée sur la production de semences d'orge *Hordeum vulgare* L. (variété Tichedrett) en zone semi-aride de M'sila. *Revue Agriculture*, Numéro spécial 1, 265-271
- Semenov M.A., and Porter, J.R, 1995. Climatic variability and the modelling of crop yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73 (4-3): 265-283
- Shahbazie M., 2005. Effects of different nitrogen levels on the yield and nitrate accumulation in the four of lettuce cultivars. MSc Thesis, Department of Horticulture, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 99 pp.
- Shoujia Sun, Ping Meng, Jin Song Zhang, Xian chong Wan, Ning Zheng, Chunxi He, 2014. Partitioning oak woodland evapotranspiration in the rockymountainous area of North China was disturbed by foreign vapor, as estimated based on non-steady-state ¹⁸O isotopic composition. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184: 36– 47.
- Shurbaji Abdel-Rahman M., Phillips Fred M., Campbell Andrew R., Knowltonb Robert G., 1995. Application of a numerical model for simulating water flow, isotope transport, and heat transfer in the unsaturated zone. *Journal of Hydrology* 171: 143-163.
- Singh A.K., Tripathy R. and Chopra U.K., 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Managemnt*, 95: 776-786.

- Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., Fereres E., 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101: 426–437.
- Steeve P. et Gaétan B. (2012). Outils agro météorologiques pour la planification de l'irrigation des cultures. Colloque en agro climatologie. 18p.
- Sun S.J., Meng, P., Zhang, J.S., Wan, X.C., Zheng, N., He, C.X., 2014. Partitioning oak wood land evapotranspiration in the rocky mountainous area of North China was disturbed by foreign vapor, as estimated based on non-steady-state O-18 isotopic composition. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184: 36–47.
- Sutanto S.J., Wenninger J., Coenders-Gerrits, A.M.J., Uhlenbrook S., 2012. Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: a comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1D model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16 (9), 3261.
- Tabatabaie S.J. and Malakouti M.J. 1997. Studies on the effect of the N, P and K–fertilizers on the potato yield and nitrate accumulation in potato tuber. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 11: 25–30.
- Toumi J., Er-Raki S., Ezzahar v, Khabba S., Jarlan L., Chehbouni A., 2015. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, 163: 219–235.
- Van Diepen C.A., Wolf J., Van Keulen H. and Rappoldt C., 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use Management*, 5: 16-24.
- Van Halsema G.E. and Vincent L., 2012. Efficiency and productivity terms for water management: a matter of contextual relativism *versus* general absolutism”. *Agricultural Water Management*, 108: 9-15.
- Wang L., Caylor K. K., Villegas J. C., Barron-Gafford G. A., Breshears D. D., and Huxman, T. E., 2010. Partitioning evapotranspiration across gradients of woody plant cover: Assessment of a stable isotope technique, *Geophysical Research Letters*, 37(9): L09401.
- Wang X.F., Yakir D., 2000. Using stable isotopes of water in evapotranspiration studies. *Hydrological Processes*, 14 (8), 1407–1421.
- Weir A.H., Bragg P.L., Porter J.R. and Rayner J.H., 1984. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *Journal of Agricultural Science*, 102: 371-382.
- Wellens J., Raes D., Traore F., Denis A., Djaby B., Tychon B., 2013. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 127: 40-47.
- Wenninger J., Beza D. T., and Uhlenbrook, S., 2010. Experimental investigations of water fluxes within the soil-vegetation-atmosphere system: stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35: 565–570.

- William J.R., Jones C.A., Kiniry J.R. and Spanel D.A., 1989. The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE*, 32: 497-511.
- Williams D.G., Cable W., Hultine K., Hoedjes J.C.B., Yepez E.A., Simonneaux V., Er-Raki S., Boulet G., de Bruin, H.A.R., Chehbouni, A., Hartogensis, O.K., Timouk, F., 2004. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sapflow and eddy covariance techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125 (3-4): 241-258.
- Westerman R. L., Kurtz L. T., 1974. Isotopic and non-isotopic estimation of fertilizer nitrogen uptake by Sudan-grass in field experiments. *Soil Science Society of America Proceedings*, 38: 107-109.
- Xiangxiang, W., Quanju, W., Jun, F., Qiuping, F., 2013. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau. *Agricultural Water Management*, 129: 95-104.
- Xu C.Y. et Singh V.P., 1998. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time scales and inter comparison of estimation methods. *Hydrological Processes*, vol. 12, n° 3, p. 429-442.
- Xu, Z., Yang H., Liu F., An S., Cui J., Wang Z., and Liu S., 2008. Partitioning evapotranspiration flux components in a subalpine shrubland based on stable isotopic measurements. *Botanical Studies*, 49: 351-361.
- Yakir D., Sternberg L. da S.L., 2000. The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange. *Oecologia*, 123: 297-311.
- Yang J. Y., Huffman E. C., Drury C. F., Yang X. M. and De Jong R., 2011. Estimating the impact of manure nitrogen losses on total nitrogen application on agricultural land in Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 91: 107-122
- Yepez E. A., Williams D. G., Scott R. L., and Lin G., 2003. Partitioning over story and understory evapotranspiration in a semiarid savanna wood land from the isotopic composition of water vapor. *Agricultural and Forest Meteorology*, 119: 53-68.
- Yepez E.A., Huxman T.E., Ignace D.D., English N.B., Weltzin J.F., Castellanos, A.E., Williams D.G., 2005. Dynamics of transpiration and evaporation following moisture pulse in semiarid grassland: a chamber-based isotope method for partitioning flux components. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132 (3-4): 359-376.
- Yepez E.A., Scott R.L., Cable W.L., Williams D.G., 2007. Intraseasonal variation in water and carbon dioxide flux components in a semiarid Riparian woodland. *Ecosystems* 10 (7): 1100-1115.
- Yepez E.A., Williams D.G., Scott R.L., Lin G.H., 2003. Partitioning over story and under story evapotranspiration in semi-arid savanna woodland from the isotopic composition of water vapor. *Agricultural and Forest Meteorology*, 119 (1-2): 53-68.
- Zapata F., 1990. Isotope techniques in soil fertility and plant nutrition studies. International Atomic Energy Agency (IAEA), 67p.

Zhang Y., Shen Y., Sun H., and Gates J. B., 2011. Evapotranspiration and its partitioning in an irrigated winter wheat field: A combined isotopic and micro meteorologic approach, *Journal of Hydrology*, 408: 203- 211.

Zhaoming C., Huoyan W., Xiaowei L., Dianjun L. and Jianmin Z., 2016. The fates of ¹⁵N labeled fertilizer in a wheat–soil system as influenced by fertilization practice in a loamy soil. *Scientific Reports* 6: 34754.

Zimmerman U., Ehhalt D., Munich K.O., 1967. Soil water movement and evapotranspiration. Changes in the isotopic composition of the water. "Isotopes in hydrology 1967", IAEA, Vienna, 567p.

<https://www.planetoscope.com/fruits-legumes/1075-production-mondiale-d-engrais.html>

<http://www.aps.dz/economie/76268-pres-de-70-de-la-consommation-d-eau-accapares-par-l-agriculture>