

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Saad Dahleb Blida 1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Biotechnologies



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences Agronomiques

Option : Eau et Environnement

Thème

SIMULATION DES BILANS HYDRIQUES PAR AQUACROP

Présenté par : HANDES Fethi

Jury :

Président : L. Zella (USDB)

Promoteur: M. Amirouche (ENSA)

Examineur: H. Degaichia (USDB)

Examinatrice: N. Degui (USDB)

Année Universitaire : 2019/2020

Introduction générale

La simulation du bilan hydrique du sol dans les systèmes de culture est essentielle pour déterminer l'eau disponible pour les cultures et l'impact environnemental possible dû à la lixiviation des solutés. La comparaison des résultats du modèle avec les observations de terrain fournit des informations sur les performances du modèle et révèle les forces et les faiblesses de ce dernier. Ceci est essentiel pour sélectionner les modèles appropriés pour une application pratique dans l'analyse des ressources en eau et/ou pour identifier les améliorations de modèles nécessaires (Soldevilla-Martinez *et al.*, 2012).

Il est nécessaire d'évaluer les besoins en eau d'une culture, afin de déterminer les volumes d'eau à apporter par l'irrigation au cours de la saison de croissance. Simonne *et al.* (2011) recommandent, pour la planification de l'irrigation dans les cultures, d'utiliser des méthodes dynamiques de bilan hydrique du sol, incluant la météorologie et l'évolution du stade phénologique de la culture, et des mesures directes de l'état hydrique du sol.

Au cœur de toutes ces méthodes, on retrouve le concept de teneur en eau du sol qui vise à mieux évaluer les besoins en eau d'irrigation.

A chaque phase de la croissance d'une plante, les besoins en eau varient, pour chaque culture et selon les différentes périodes de développement végétatif ; car la consommation en eau des cultures dépend de différents éléments climatiques : la température, l'humidité de l'air, le vent et l'ensoleillement.

Pour assurer une bonne régie de l'eau, il est d'abord indispensable de connaître les besoins de la culture et la variation de ceux-ci en fonction du stade de développement. Aussi, il est impératif de mesurer régulièrement la teneur en eau du sol. Cette information permettra de préciser le moment propice à l'irrigation et surtout si les quantités appliquées sont insuffisantes ou en excès par rapport au type de sol et au besoin de la culture.

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 étude, 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). L'objectif de la présente étude est de vérifier la capacité du modèle AquaCrop à simuler les bilans hydriques du sol. Et ce, par la comparaison de bilans hydriques simulés par ce modèle Avec ceux mesurés par la méthode de référence qui est la gravimétrie.

Ce document est structuré en trois parties :

- La première partie abordera dans un premier temps le bilan hydrique, sa définition, ses méthodes de mesure et ses importances. Dans un second chapitre les caractéristiques des cultures en question (son origine, sa classification botanique, leurs places à l'échelle mondiale et nationale) et enfin le dernier chapitre abordera le modèle de culture (AquaCrop) qui a été choisis comme des outils principal à la modélisation.
- La deuxième partie traitera la présentation du site d'étude (localisation, caractéristiques climatiques et pédologiques), et les différents jeux de données utilisés pour l'élaboration de la présente thématique de recherche.
- Enfin, la troisième partie du document sera consacrée aux travaux de modélisation. Elle traite les résultats de simulations obtenus par le modèle AquaCrop et les ceux mesurés sur le champ par la méthode gravimétrique et leurs discussions.

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

Synthèse bibliographique

CHAPITRE 1. BILAN HYDRIQUE

L'étude du bilan hydrique du sol intéresse un éventail de plus en plus large de disciplines scientifiques et techniques: science du sol, agronomie, gestion de l'eau, conseil à l'irrigation, télédétection "thermique" et modélisation du climat du globe. En effet, la connaissance du bilan hydrique a pour objet la détermination de la réserve en eau du sol.

1. Bilan hydrique

Le bilan hydrique est la différence entre les apports et les pertes d'eau dans le sol. Plus précisément, il permet de déterminer les échanges entre l'atmosphère et le système sol-végétation. Ce bilan est très important au niveau agronomique, car il évalue les variations des réserves d'eau disponibles dans le sol pour les plantes. En effet, le sol, en fonction de sa texture et de sa structure, possède la capacité de stocker l'eau et de la restituer aux végétaux. L'ensemble de ces échanges, entre l'atmosphère, le sol et la plante, se produit sous la forme de flux (figure 1).

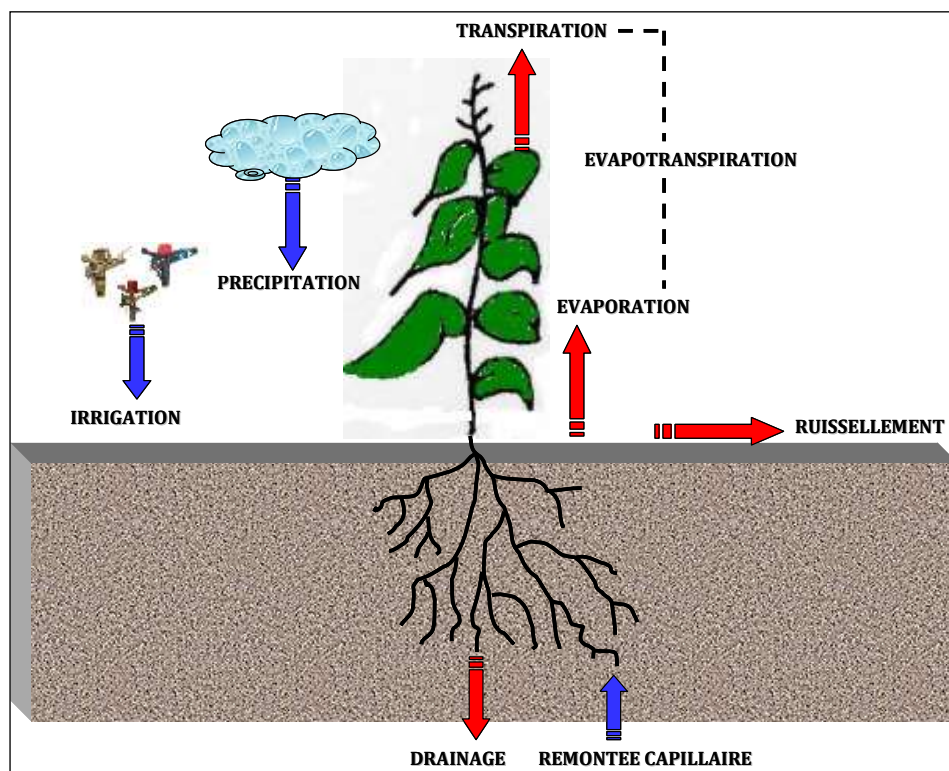


Figure 01. Bilan hydrique d'une culture

- Précipitation, infiltration, ruissellement et drainage

L'eau apportée au sol en surface peut avoir une origine naturelle (pluie) ou une origine artificielle (irrigation). Dans les deux cas, une partie de cet apport ruisselle à la surface du sol alors qu'une autre partie s'infiltré dans le sol. L'infiltration est très influencée par les caractéristiques physiques du sol (texture, structure) mais aussi par les caractéristiques

hydrodynamiques. En effet, le transport de l'eau varie selon que le sol est saturé ou non en eau. Un sol saturé aura la totalité de ses pores remplie d'eau. Un sol non saturé se caractérisera par des pores partiellement remplis. Ainsi, à chacune de ces modalités correspond un régime hydrodynamique particulier (tableau 1).

Tableau 1. Les différents régimes hydrodynamiques des sols saturés et non saturés en eau (Calvet, 2013).

| Régimes hydrodynamiques | Définitions | Intérêts / conséquences |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sols saturés en eau. | | |
| Drainage | -Ecoulement généralement vertical de l'eau | - Assainissement des sols. - Pollution eaux souterraines. |
| Ruissèlement de surface | -Ecoulement de l'eau à la surface du sol quand elle ne peut pas y pénétrer ou qu'elle y pénètre très peu. | - Perte d'eau. - Pollution eaux de surface. |
| Sols non saturés en eau. | | |
| Infiltration | -Pénétration de l'eau dans le sol apportée par des précipitations ou l'irrigation. | - Reconstitutions des réserves en eau du sol. - Transferts des polluants vers les eaux souterraines. |
| Redistribution | -Répartition de l'eau dans le sol sans apport et sans évaporation. | - Uniformisation des eaux du sol - Transferts des polluants. |
| Dessèchement | -Transport de l'eau en phase liquide et gazeuse sous l'effet de l'évapotranspiration. | - Pertes d'eau. - Mouvement ascendant des sels minéraux (chlorures, sulfates). |

2. Suivi des bilans hydriques

L'étude de l'évolution au cours du temps des flux d'eau nécessite la mesure à la fois des apports, des humidités et des charges hydrauliques.

2.1. L'humidité du sol

L'humidité du sol est un paramètre important dans le bilan hydrique du sol et en irrigation, et peut fournir de l'information sur le potentiel hydroélectrique et d'irrigation d'un bassin. Dans les régions de déforestation active, les évaluations de la teneur en humidité du sol aident à la prévision du volume de ruissellement, des taux d'évaporation et de l'érosion du sol.

L'humidité de surface du sol conditionne les échanges avec l'atmosphère par l'intermédiaire du bilan d'énergie à la surface du sol (très différent sur une surface séché ou sur une surface humide), elle est importante en raison de son impact sur l'évaporation du sol et transpiration. Ce qui conditionne les transferts de masse et de chaleur entre la terre et l'atmosphère (**Koster, 2004**).

La connaissance de l'humidité du sol est donc très utile dans les modèles de prévision météorologiques via des modèles de circulation générale. Enfin, une surveillance continue de l'humidité du sol sur une grande échelle, et sur de longues périodes de temps, donne un aperçu des modifications éventuelles du climat.

Cependant, l'humidité du sol est un terme très vague et il est important de le définir. La définition la plus commune de ce terme est la quantité totale d'eau présente dans la zone insaturée. Pour des raisons pratiques, cette humidité est souvent séparée en deux composantes, l'humidité du sol de surface, correspondant aux premiers centimètres (5cm en général), et l'humidité de la zone racinaire du sol (deuxième réservoir) (**Hillel, 1988**).

3. Différentes techniques de mesures de l'humidité du sol

L'humidité du sol (ou eau contenue dans le sol) détermine de façon essentielle la variation des caractéristiques de différents matériaux ou sols. Le taux d'humidité d'un sol en particulier va déterminer les caractéristiques de diffusion ou de stockage de l'eau dans ce sol. Ces caractéristiques concernent aussi bien les intrants solides que liquides qui vont pénétrer dans le sol. Il existe différentes techniques de mesure de l'humidité d'un sol (ou autres substrats équivalents), certaines sont analysées au laboratoire, d'autres donnent l'état du sol in situ.

3.1. Méthodes gravimétrique

L'estimation de l'humidité du sol par la méthode de gravimétrie est extrêmement simple de mise en œuvre, mais néanmoins lourde, coûteuse en temps et perturbant le terrain. Il s'agit de prélever avec une tarière, à différentes profondeurs sur un axe vertical, des échantillons de sol que l'on place immédiatement dans une boîte hermétique. Chaque échantillon est pesé avec la boîte à l'état frais et après un séchage de 48 heures à l'étude (température de 105°C). L'humidité volumique (« θ_{vol} ») de chaque prélèvement est déduite d'une simple relation entre l'humidité pondérale (« H_{pond} ») et la densité du sol :

$$H_{pondérale} = (M_h - M_s)/M_s \dots \dots \dots (1)$$

M_h : Poids de l'échantillon à l'état humide

M_s : Poid de l'échantillon à l'état sec

$$H_{volumique} = (H_p * d_a)/1000 \dots \dots \dots (2)$$

d_a : Densité apparente (g/cm^3)



Figure 2. Schéma type de la méthode thermogravimétrique.

3.2. Mesures par les sondes neutroniques

Cette méthode reste particulièrement efficace mais chère et désormais beaucoup trop réglementée (caractère radioactif du principe de l'appareil) pour être utilisée simplement par un opérateur.

-Le principe de l'humidimètre neutronique s'appuie sur l'utilisation d'une faible source radioactive qui émet en continu des neutrons rapides. Ces neutrons perdent leur énergie lorsqu'ils percutent des atomes d'hydrogène, devenant lents. Ainsi, le nombre de neutrons lents retournant à la source est lié à la quantité d'atomes d'hydrogène entourant la source. Si l'on admet que la majeure partie de l'hydrogène appartient aux molécules d'eau, ce nombre estime la quantité d'eau autour de la source. Cette hypothèse constitue la base de la mesure d'humidité des sols avec la sonde à neutrons.

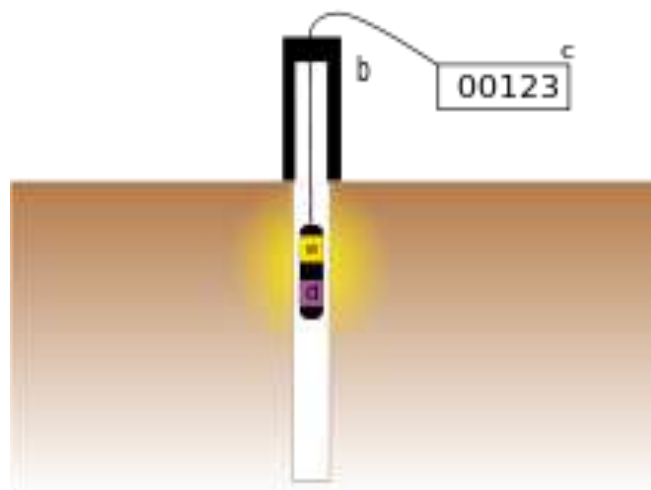


Figure 3. Dispositif d'un humidimètre à neutrons

Source : (Wikipédia, 2020)

3.3. Méthode par Tensiomètre

Le tensiomètre est constitué d'un cylindre de plastique creux muni à la base d'une bougie poreuse. Près de la partie supérieure, se trouve un manomètre. Le tensiomètre est enfoui dans le sol de façon à ce que la bougie soit placée à la profondeur de mesure voulue. Lorsque le sol s'assèche, l'eau diffuse à travers la bougie poreuse vers le sol. Comme le tube est étanche, il se crée alors une tension qui est mesurée par le manomètre. Plus celui-ci présente des valeurs élevées, plus le sol est sec. Lorsque le sol est saturé, la tension est nulle. Les valeurs mesurées par le manomètre indiqueront donc quand il est nécessaire d'irriguer. La plupart des tensiomètres sont gradués de 0 à 100 centibars et certains modèles le sont de 0 à 40.



Figure 4. Schéma du tensiomètre de sol

3.4. Méthode TDR

Née dans les années 1980, la méthode TDR (réflectométrie temporelle) se place comme une méthode incontournable tant par la qualité que par la convivialité de ses mesures. Le principe de cette mesure est basé sur la détermination du temps de propagation d'un pulse électromagnétique le long d'une électrode introduite dans le sol. Le temps de propagation de ce pulse dépend étroitement de l'humidité du sol (mesure de permittivité diélectrique). Son volume d'influence est supérieur à celui des techniques capacitives. La mesure est par ailleurs faiblement influencée par la température, la salinité et le type de sol.

- Les sondes TDR cherchent aussi à mesurer la permittivité relative du sol mais cette mesure s'effectue grâce à un générateur-enregistreur d'ondes électromagnétiques. Une onde est créée par la sonde et se propage le long d'un guide d'ondes (tige métallique parallèle) puis arrivant au bout de ce guide, se réfléchit et est enregistrée par la sonde (figure 5). Le temps d'aller-retour de l'onde permet de calculer sa vitesse (V) qui est liée aux parties réelles et imaginaires de la permittivité relative du sol.

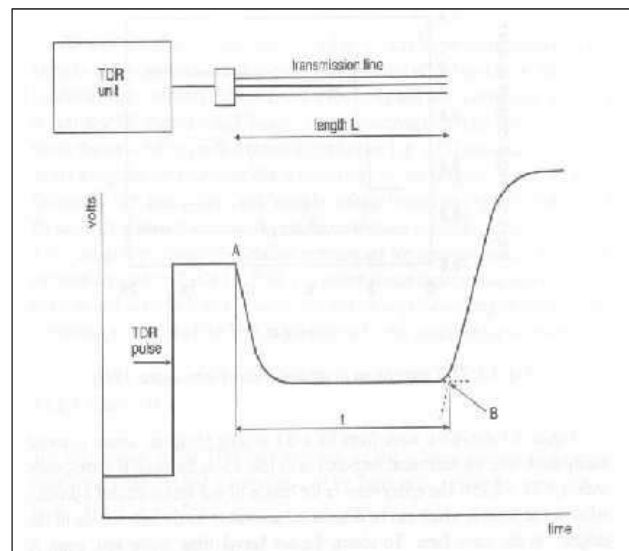


Figure 5. TDR et du signal théorique obtenu.

3.5. Méthode sonde capacitive DIVINER 2000

Le Diviner 2000 est un système portable de mesure de l'humidité du sol. Il consiste en une console d'affichage des données et une sonde portable.

La sonde portable (figure 6) mesure la teneur en eau du sol à des intervalles réguliers de 10 cm de profondeur à travers le profil du sol. Les relevés s'effectuent à travers la paroi d'un tube d'accès en PVC. Les données sont recueillies en provenance d'un réseau de tubes d'accès posés dans des sites sélectionnés.

Ni besoin de s'arrêter, de poser, ni de tenir la sonde à une profondeur donnée pour effectuer un relevé. En un seul geste 'swipe and go', le Diviner 2000 enregistre les données de tous les niveaux du profil jusqu'à la profondeur maximum de la sonde : à savoir 0,7 mètre, 1 mètre ou 1,6 mètre



Figure 6. Diviner 2000

CHAPITRE 2. GÉNÉRALITÉS SUR LE BLÉ DUR ET LE POIS CHICHE

1. Généralités sur le blé dur

Le blé dur est une plante herbacée, appartenant au groupe des céréales à paille qui sont caractérisée par des critères morphologiques particuliers.

2. Classification et origine du blé dur

2.1. Classification botanique

Le blé dur cultivé (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum* (Desf.) Husn.) est une sous espèce domestiquée qui appartient aux blés tétraploïdes, et à l'espèce *Triticum turgidum* (Kislev et Feldman, 2007). Une classification détaillée (Cronquist et Takhtadzhia n, 1981) est donnée dans le tableau ci-dessus (Tableau 2).

Tableau 2. Classification de Cronquist (1981)

| | |
|----------------------|----------------------|
| Règne | Règne |
| <i>Plantae</i> | <i>Plantae</i> |
| Sous-règne | Sous-règne |
| <i>Tracheobionta</i> | <i>Tracheobionta</i> |
| Division | Division |
| <i>Magnoliophyta</i> | <i>Magnoliophyta</i> |
| Classe | Classe |
| <i>Liliopsida</i> | <i>Liliopsida</i> |
| Sous-classe | Sous-classe |
| <i>Commelinidae</i> | <i>Commelinidae</i> |
| Ordre | Ordre |
| <i>Cyperales</i> | <i>Cyperales</i> |

2.1.1. Origine génétique

Le blé constitue le genre *Triticum* qui comporte de nombreuses espèces, se répartissant en trois groupes selon leur nombre de chromosomes (Allioui, 1993).

Le groupe Diploïde : ($2n = 14$ chromosomes) ou *triticum monococcum*

Le groupe Tétraploïde : ($2n = 28$ chromosomes) ou *triticum dicoccum* (Amidonier), ici on trouve *Triticum durum* (blé dur).

Le groupe Héxaploïde ($2n = 42$ chromosomes) ou *triticum sativum*.

2.1.2. Origine géographique

Selon Vavilové in Erroux (1961), le blé dur a deux origines : l'Abyssinie et l'Afrique du Nord. Alors que pour Grignac (1978), le Moyen Orient est le centre générateur du blé dur,

où il s'est différencié dans trois régions : le bassin occidental de la méditerranée, le sud de la Russie et le Proche Orient (Syrie et nord de la Palestine) (Hennouni, 2012).

2.2 Description morphologique de blé dur

Le blé est une plante herbacée annuelle qui produit le grain. C'est une graminée de hauteur moyenne pouvant atteindre jusqu'à 1.5m selon les variétés (Bozzini, 1988). L'appareil végétatif comprend l'appareil aérien et l'appareil racinaire (Gate et Giban, 2003).

2.2.1. Le système racinaire

Le système racinaire est de type fasciculé. En cour de développement, deux systèmes se forment :

- Le système racinaire séminal (primaire) : fonctionne de la germination au tallage.
- Le système racinaire coronaire (secondaire) : apparait au stade tallage (Moule, 1971).

2.2.2. Le système aérien

Le système aérien est formé d'un certain nombre d'unité biologique, les talles, les feuilles et les graines. La talle est formée d'une tige feuillée ou chaume portant à son extrémité une inflorescence (Clarke *et al.*, 2002). Les feuilles se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèle et d'une extrémité pointue. Au point d'attache de la gaine de la feuille se trouve une membrane mince et transparente (ligule) comportant deux petits appendices latéraux, les oreillettes.

2.2.3. L'appareil reproducteur

Les fleurs sont groupées en inflorescences de type épi, l'épi est composé d'épillets, L'épillet est une petite grappe d'une à cinq fleurs enveloppées chacune par deux glumelles. L'épi est constitué d'un axe appelé le rachis sur lequel sont fixés les épillets. Le blé est une plante monoïque à fleurs parfaites, Elle se reproduit par voie sexuée et par l'autofécondation (espèce autogame) (Moule, 1971).

2.2.4. Le grain

Le grain de blé est un caryopse. C'est un fruit sec indéhiscent. Il est de couleur jaune-ambree à violacé selon l'espèce blé dur ou blé tendre et selon la variété. Il présente une

partie plane (ventrale) et une partie dorsale légèrement bombée. La base élargie contient le germe et le sommet est garni de petits poils (la brosse). La partie ventrale est fendue par un sillon qui pénètre profondément dans le grain ; cependant la partie dorsale présente une arête plus ou moins prononcée (Gonde, 1986).

La coupe longitudinale révèle de l'extérieure vers l'intérieur les parties suivantes : les enveloppes, le germe et l'albumen ou amande :

✓ **Les enveloppes du fruit**

Elles représentent 14 à 16 % du poids du grain. Elles sont constituées de l'extérieur vers l'intérieur par :

- Le péricarpe : parois de l'ovaire qui comprend l'épicarpe ; le mésocarpe et l'endocarpe.
- Le tégument : enveloppe de la graine qui comprend le tégument séminal et la bande hyaline.
- L'assise protéique : qui représente 60% du poids des enveloppes et constitué de cellules à aleurones, riches en protéines (Soltner, 1987).

✓ **Le germe**

Il représente 2,5 à 3 % du grain et comprend :

Le cotylédon ou scutellum, séparé de l'amande par une assise diastatique destinée à la digestion future de l'albumen au profit de la plantule. - La plantule, avec sa gemmule recouverte d'un étui, la coléoptile, sa tigelle courte, et sa radicule, recouverte d'un étui, la coléorhize.

Le germe est très riche en matières grasses, matières azotées et vitamines A, E et B (Soltner, 1987).

✓ **L'albumen ou amande**

Il représente 83 à 85 % du poids du grain, est composé de 70% d'amidon et de 7% de gluten. Chez le blé dur l'albumen est corné et vitreux, un peu comme celui du riz. L'albumen joue un rôle essentiel dans la composition de la semence ; il sert de réserve et ne sera complètement utilisé qu'au moment de la germination

2.3. Le cycle de développement

En général toutes les céréales en le même cycle de développement. Selon (Boufenar *et al.*, 2006) le développement représente l'ensemble des modifications phénologique qui apparaissent au cours du cycle de la culture. Trois périodes repères caractérisant le développement du blé à savoir : la période végétative, reproductrice et période de maturation.

2.3.1. Période végétative

❖ Germination

La germination est l'ensemble des phénomènes par lesquels la plantule, en vie ralentie dans la graine mure, commence une vie active et se développe grâce à des réserves contenues dans cette dernière (Mazoyer, 2002).

La germination commence quand le grain a absorbé environ 25% de son poids d'eau. Les téguments se déchirent, la racine principale, couverte d'une enveloppe appelée Coleorhize, apparait, suivie par la sortie de la première feuille, couverte d'une enveloppe appelée Coléoptile, à la surface du sol, puis apparaissent d'autres racines et feuilles. La durée de cette phase varie avec la température de 8 à 15 jours (Clement et Prat, 1970)

❖ Levé

La levée est notée quand 50% de plantules sont sorties du sol (Karou *et al.*, 1988), et que la première feuille pointe au grand jour son limbe. Deux autres feuilles suivent (Hucl et Baker, 1998, Davidson et Chevalier, 1990). Pendant cette phase, les jeunes plantes sont sensibles au manque d'eau qui provoque une diminution de nombre (Karou *et al.*, 1998).

❖ Tallage

Cette phase s'annonce à partir de la quatrième feuille. Le début du tallage est marqué par l'apparition de l'extrémité de la première feuille de la talle latérale primaire puis d'autres talles naissent successivement à l'aisselle des 2^{ème} et 3^{ème} feuille de la tige centrale ; l'ensemble restant court nouer, formant un plateau de tallage situé juste au niveau du sol (Figure 08). Ces talles primaires peuvent ensuite émettre des talles secondaires, lesquels à leurs tours émettent des talles tertiaire (Belaid, 1986 ; Gate, 1995). La fin du tallage est celle de la fin de la période végétative, elle marque le début de la phase reproductrice, conditionnée par la photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entre nœuds (Gate, 1995).

2.3.2. Périodes de reproduction

❖ Montaison- Gonflement

Elle se manifeste à partir du stade épi à 01cm, par l'élongation du premier entrenœud. Ce stade est repérable une fois l'ébauche de l'épi du brin-maitre atteint 01cm de hauteur à partir de la couronne ou plateau de tallage (Gate, 1995). Ce stade est sensible aux basses températures variantes entre +4 et 0°C. Selon (Baldy, 1984), la montaison constitue la phase la plus critique du développement du blé. Cette phase s'achève une fois l'épi prend sa forme définitive à l'intérieur de la gaine de la feuille étendard qui gonfle. La durée de la phase est de 29 à 30 jours (Clement et Prat, 1970).

❖ Epiaison- floraison

L'épiaison est déterminée par l'apparition de l'épi hors de la gaine de la dernière feuille. Les épis dégainés fleurissent généralement entre 4 à 8 jours après l'épiaison (Bahlouli *et al.*, 2005). Les basses températures au cours de ce stade réduisent fortement la fertilité des épis (Abbassenne *et al.*, 1998). Sa durée est de 16 à 17 jours (Clement et Prat, 1970).

❖ Remplissage du grain

Cette phase marque la modification du fonctionnement de la plante qui sera alors orientée vers le remplissage des grains à partir de la biomasse produite. Au début, le grain s'organise, les cellules se multiplient. Les besoins des grains sont inférieurs à ce que fournissent les parties aériennes (plus de 3/4 de la matière sèche sont stockés au niveau des tiges et des feuilles). Par la suite, les besoins augmentent et le poids des grains dans l'épi s'élève, alors que la matière sèche des parties aériennes diminue progressivement. Seulement 10% à 15% de l'amidon du grain peut provenir de réserves antérieures à la floraison (Boulelouah, 2002).

A l'issue de cette phase, 40 à 50% des réserves se sont accumulées dans le grain qui, bien qu'il ait atteint sa taille définitive, se trouve encore vert et mou, c'est le stade «grain laiteux». L'autre partie des réserves se trouve encore dans les tiges et les feuilles qui commencent à jaunir. Les réserves du grain proviennent en faible partie de la photosynthèse nette qui persiste dans les dernières feuilles vertes. Chez les variétés tardives, cette quantité est de 12 % contre 25 % chez les précoces. La majeure partie des réserves accumulées vient des tiges et les feuilles jaunissantes, mais non encore desséchées (Boulelouah, 2002).

2.3.3. Période de maturation

La phase de maturation succède au stade pâteux (45 % d'humidité). Elle correspond à la phase au cours de laquelle le grain va perdre progressivement son humidité en passant par divers stades (Gate, 1995). Elle débute à la fin du palier hydrique marqué par la stabilité de la teneur en eau du grain pendant 10 à 15 jours. Au-delà de cette période, le grain ne perdra que l'excès d'eau qu'il contient et passera progressivement aux stades « rayable à l'angle » (20 % d'humidité) puis, « cassant sous la dent » (15-16 % d'humidité) (Gate, 1995).

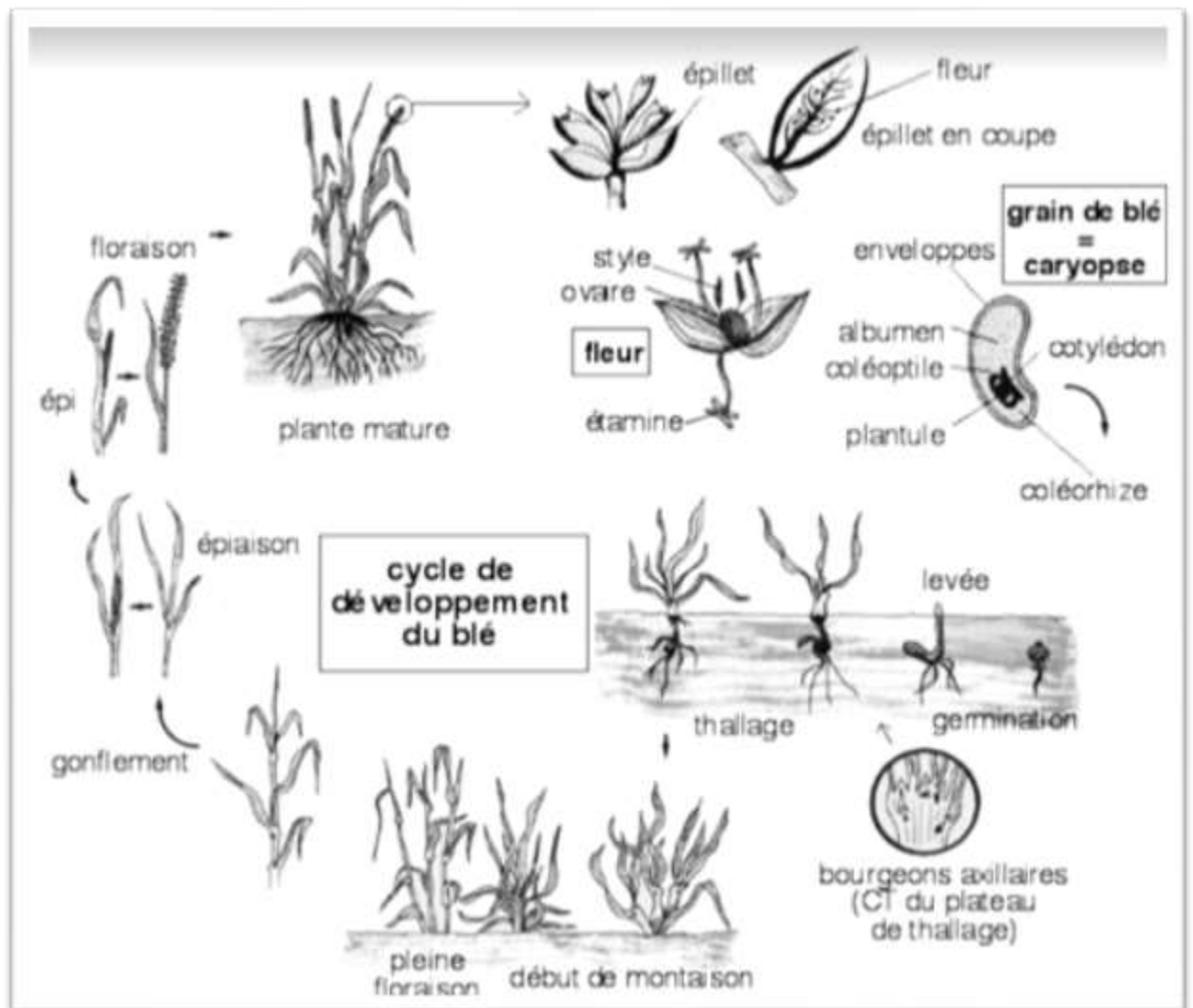


Figure 7 : Le cycle de développement du blé (Henry et De Buyser, 2000).

2.4. Les exigences de blé dur

Un bon comportement de la culture durant tout son cycle de développement exige la réunion de certains facteurs qui conduisent à l'observation d'un meilleur rendement et parmi les exigences on peut citer :

2.4.1. Les exigences édaphiques

D'après (Soltner, 2000) ; le blé dur préfère les sols du type argilo-calcaire ou limoneux à limono-argileux à cause de son système racinaire fasciculées. Les sols qui conviennent le mieux au blé dur sont :

- 1- Les sols profonds (plus de 60cm de profondeur).
- 2- Les sols suffisamment riches en matières organiques et minérales.
- 3- Les sols bien drainés pour éviter tout développement de maladies.
- 4- Les sols capables de maintenir une réserve en eau suffisant pour assurer une bonne alimentation au moment de l'accumulation des réserves dans le grain.

2.4.2. Les exigences climatiques**➤ Température**

La température est l'un des facteurs importants pour la croissance et l'activité végétative. Selon (Soltner, 1988), Le blé a un zéro de végétation très bas, à 0° c, son exigence en chaleur est très élevée, pour accomplir son cycle végétatif, il lui faut un cumul de température total de 2300°C, qui se répartissant comme suite :

- ✓ Semi-germination 150° C
- ✓ Germination- tallage 500 °C
- ✓ Tallage- floraison 85° C
- ✓ Floraison-maturation 800° C

➤ Lumière

La lumière est le facteur qui agit directement sur le bon fonctionnement de la photosynthèse et le comportement du blé (Benasseur, 2003). Selon (Soltner, 2005), le bon tallage est garanti, si le blé est placé dans les conditions optimales d'éclairement, dont dépendent à la fois résistance des tiges à la verse et le rendement.

➤ L'eau

Selon (Soltner, 1990), l'eau a une grande importance dans la croissance de la plante. En plus de l'eau de constitution des cellules et de celle qui entre dans les synthèses glucidiques catalysées par la chlorophylle, l'eau est le véhicule des éléments minéraux solubles de la sève brute.

A cet égard, (Clément et Parts, 1970) voient qu'il est intéressant de définir le coefficient de transpiration du blé, c'est-à-dire la quantité d'eau qui doit traverser la plante pour l'élaboration d'une certaine quantité de matière sèche. Pour le blé, suivant les variétés, la valeur du coefficient de transpiration varie de 450 à 550 grammes d'eau pour un gramme de matière sèche.

➤ Fertilisation

La fertilisation est raisonnée sur le principe de la restitution au sol des quantités d'éléments (N, P, K) fertilisants prélevés par les récoltes. Le blé a besoin de ces trois éléments essentiels et le rôle de chaque élément sur le plan de blé présenté dans le tableau 3 suivant (Hacini, 2014).

Tableau 3 : les principaux éléments de fertilisation et leur rôle.

| Les éléments | Le rôle |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| L'azote | C'est un facteur déterminant du rendement. -Il permet la multiplication et l'élongation des feuilles et des tiges. -Il a pour rôle l'augmentation de la masse végétative |
| Phosphore | C'est un facteur de croissance qui favorise le développement des racines en cours de végétation. - C'est un facteur de précocité qui favorise la maturation. - Il accroît la résistance au froid et aux maladies. - C'est un facteur de qualité |
| Potassium | -Il régule les fonctions vitales de la croissance végétale. -Il est nécessaire à l'efficacité de la fumure azotée. -Il permet une économie d'eau dans les tissus de la plante. -Il assure une meilleure résistance à la verse et aux maladies |

2.5. Importance de la culture de blé dur

2.5.1. Dans le monde

Dans le monde, l'union européenne (principalement l'Italie, l'Espagne et la Grèce) est le plus grand producteur de blé dur, avec une récolte annuelle moyenne de huit millions de tonnes métriques (Mouellef, 2010). Le Canada arrive au deuxième rang avec 4,6 millions de tonnes métriques par année, suivi de la Turquie et des Etats-Unis, avec respectivement 4 et 3,5 millions de tonnes métriques.

De point de vue importance alimentaire, les céréales occupent une place de choix parmi toutes les autres spéculations car elle constitue la base alimentaire qui fournit l'essentiel des apports énergétique et protéiques. En effet, le blé a l'avantage de fournir en abondance des calories sous la forme la moins coûteuse qui soit un kilo de pain fournit plus de 3000 calories, 14% de protéines et de 1 à 2% de matière grasse assurant ainsi une énergie suffisante pour travailler chaque jour (Universalisé, 1998 citer par Maamri et al., 2010).

2.5.2. En Algérie

En Algérie le blé dur occupe une place très importante vu la superficie consacrée. Le tableau 4, cité ci-dessous présente l'évolution de la superficie, de la production et le rendement de blé dur en Algérie durant sur une période de 20 ans (1998-2017). Il est constaté que la production durant cette période a passé de 15000000 de quintaux à 19909569.78 quintaux. Par contre les rendements sont passés de 8,79 qx/ha en 1998 à 16,94 qx/ha donc c'est le double

Tableau 4: évolution de la superficie, production et le rendement de blé dur en Algérie (1998- 2017)

| Années | Surface (ha) | Production (qx) | Rendement (qx/ha) |
|--------|--------------|-----------------|-------------------|
| 1998 | 1707240 | 15000000 | 8.786110916 |
| 1999 | 889090 | 9000000 | 10.12270974 |
| 2000 | 544470 | 4863340 | 8.932246037 |
| 2001 | 1112180 | 12388650 | 11.13906922 |
| 2002 | 813890 | 9509670 | 11.68422023 |
| 2003 | 1265370 | 18022930 | 14.2432095 |
| 2004 | 1307590 | 20017000 | 15.3083153 |
| 2005 | 1042894 | 15687090 | 15.04188345 |
| 2006 | 1162880 | 17728000 | 15.24490919 |
| 2007 | 1187620 | 15289985 | 12.87447584 |
| 2008 | 726105 | 8138115 | 11.20790382 |
| 2009 | 1262842 | 20010378 | 15.84551195 |
| 2010 | 1181774 | 18089739 | 15.30727449 |
| 2011 | 1230414 | 21957900 | 17.84594454 |
| 2012 | 1342881 | 24071180 | 17.92502835 |
| 2013 | 1180332 | 23323694 | 19.7602827 |
| 2014 | 1182127 | 18443334 | 15.60182112 |
| 2015 | 1314013.88 | 20199389.73 | 15.37228034 |
| 2016 | 1091592.78 | 19376183.3 | 17.75037693 |
| 2017 | 1175621.63 | 19909569.78 | 16.93535511 |

Source : (MADR, 2020)

2.6. Zones de production du blé dur en Algérie

L'aire de culture du blé dur s'étend des zones sub-littorales aux zones des hautes plaines et hauts plateaux. Ainsi, le blé dur occupe 50% des emblavures céréalières divisées en trois régimes d'humidité : humide, semi-humide et aride, dans les hautes plaines, dans les hauts plateaux et dans les zones sub-littorales ou littorales (Benbelkacem *et al.*, 1995). En général, la culture du blé dur est associée aux zones semi-arides dont la pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 300- 400 mm (Srivastava, 1984; Daaloul, 1988). Elle est donc soumise à différentes contraintes abiotiques qui minimisent de façon très significative le rendement en grains (Bahlouli *et al.*, 2008) Les principales zones de production en Algérie sont :

- ❖ La zone semi-aride des plaines telliennes dont la pluviométrie est comprise entre 350 et 500 mm, avec une distribution irrégulière (Constantine, Bouira, Médéa, Tlemcen, Mila, Souk Ahras, Aïn Defla, Chlef, Aïn Témouchent, Relizane et Sidi Bel Abbès) ;
- ❖ La zone sub-aride des hauts-plateaux caractérisée par une faible pluviométrie (200-350 mm) et une altitude supérieures à 1.000 m (Tissemsilt, Tiaret, Sétif, Saïda, Oum El – Bouaghi et Bordj Bou Arréridj) ;
- ❖ La zone humide et sub-humide des régions littorales et sub-littorales Centre - Est du pays (Tipaza, Skikda, Guelma, ElTarf, Béjaïa, Tizi Ouzou et Annaba), dont la pluviométrie est supérieure à 600 mm et relativement bien distribuée (Benbelkacem, 1997).

2. Généralités sur le pois chiche

2.1. Origine et historique

Le pois chiche cultivé (*Cicer arietinum* L.) a été l'une des premières légumineuses à grains à être domestiquée dans le Vieux Monde. Il provient d'une région du Sud-Est actuel de la Turquie et de la Syrie (Van der Maesen, 1987) et probablement de Hacilar près de Burdur aux alentours de 5450 av. J.-C. (Helbaek, 1970). On y trouve trois espèces annuelles de *Cicer* sauvages, étroitement apparentées au pois chiche (Van der Maesen, 1987). Selon le même auteur, des indices linguistiques indiquent que le pois chiche à grosses graines et de couleur crème est arrivé en Inde il y a seulement deux siècles, apparemment via l'Afghanistan, son nom en hindi étant Kabulichana (chana = pois chiche), une allusion à Kaboul, la capitale afghane. Le pois chiche à petites graines et de couleur foncée est appelé

Desi (local) et ces dénominations sont maintenant utilisées assez largement pour distinguer les deux principaux groupes de cultivars.

La distribution géographique de ces deux types diffère, les Kabuli tendant à se limiter à la Méditerranée occidentale, où les Desi sont principalement absents bien qu'ils s'étendent de la Méditerranée orientale à l'Asie centrale et au sous-continent indien (**Moreno et Cubero, 1978**).

2.2. Classification botanique

Le pois chiche *Cicer arietinum* L. ($2n = 16$) appartient au genre *Cicer*, à la tribu Cicereae, à la famille Fabaceae et à la sous-famille Faboideae. La classification détaillée de pois chiche selon l'APG III (**Bremer et al., 2009**) est présentée dans le tableau suivant (tableau 6) :

Tableau 6. Classification de pois chiche selon l'APG III (2009)

| | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Règne | Règne |
| <i>Plantae</i> | <i>Plantae</i> |
| Clade | Clade |
| Angiospermes | Angiospermes |
| Clade | Clade |
| Dicotylédones vraies | Dicotylédones vraies |
| Clade | Clade |
| Noyau des Dicotylédones vraies | Noyau des Dicotylédones vraies |
| Clade | Clade |
| Rosidées | Rosidées |
| Clade | Clade |
| <i>Fabidées</i> | <i>Fabidées</i> |

2.3. Importance et production de la culture de pois chiche

2.3.1. Dans le monde

Le pois chiche est une culture appréciée qui fournit des aliments nutritifs à une population mondiale en expansion et deviendra de plus en plus important avec le changement climatique (**Muehlbauer et Sarker, 2017**). Sur le plan nutritionnel, le pois chiche est une source de protéines hautement nutritive et peu coûteuse, estimée à 24% comme moyenne et comprise entre un intervalle de 15 à 30% selon les variétés et l'environnement (**Hulse, 1994**) et il contient également entre 60 et 65% de glucides, 6% de matières grasses et constitue une bonne source de minéraux et de vitamines B essentielles. Les types Desi et Kabuli ont de nombreuses utilisations. Ils peuvent être bouillis, consommés crus en tant que légume frais, rôtis, décortiqués pour en faire du dal ou transformés en une farine

pouvant être ajoutée au pain (Muehlbauer et Sarker, 2017). En raison de ces utilisations diversifiées de la culture et de sa capacité à se développer mieux avec de faibles intrants dans des environnements édaphiques et arides difficiles, que de nombreuses autres cultures, c'est un élément important des systèmes de culture de subsistance dans le sous-continent indien, en Asie occidentale et en Afrique du Nord. L'un de ces attributs est sa capacité à tirer plus de 70% de son azote de la fixation symbiotique (Saxena et Yadav, 1975). Au niveau mondial, le pois chiche se classe au troisième rang des légumineuses et représente 10,1 millions de tonnes/an répartis sur 10 principaux producteurs (figure 8) sur des superficies de 13,5 millions d'hectares tandis que les rendements sont d'environ 800 kg/ha (Muehlbauer et Sarker, 2017).

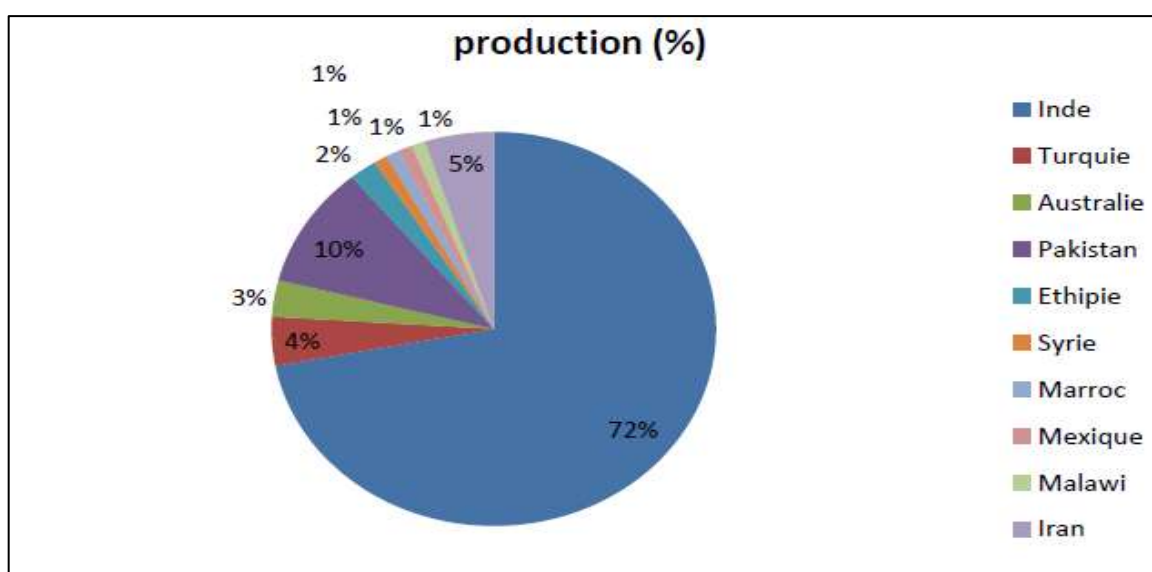


Figure 8. Importance relative des 10 principaux pays producteurs de pois chiche. Source : FAOSTAT 2015.

2.3.2. En Algérie

En Algérie, le pois chiche est l'une des principales légumineuses alimentaires, il occupe une place importante dans le domaine agricole. En termes de surfaces cultivées, cette espèce occupe la deuxième place après la fève et la féverole (Abdelguerfi-Laouar *et al.*, 2001). En effet, il est cultivé depuis longtemps et son utilisation comme aliment humain est assez fréquente dans les soupes (Chorba et Harira), les sauces (Couscous), les plats (Tadjines) et les sandwichs (karentika) (Labdi, 1990). Entre 2009 et 2013, les superficies cultivées en pois chiche étaient de 27,419 ha, les rendements ont atteint 886 kg/ha et la production était de 24,408 t (figure 9), tandis que les importations étaient 69,950 t (Muehlbauer et Sarker, 2017). Les Wilayas de Ain Temouchent et Mostaganem à l'ouest du pays sont les premières dans la production de pois chiche.

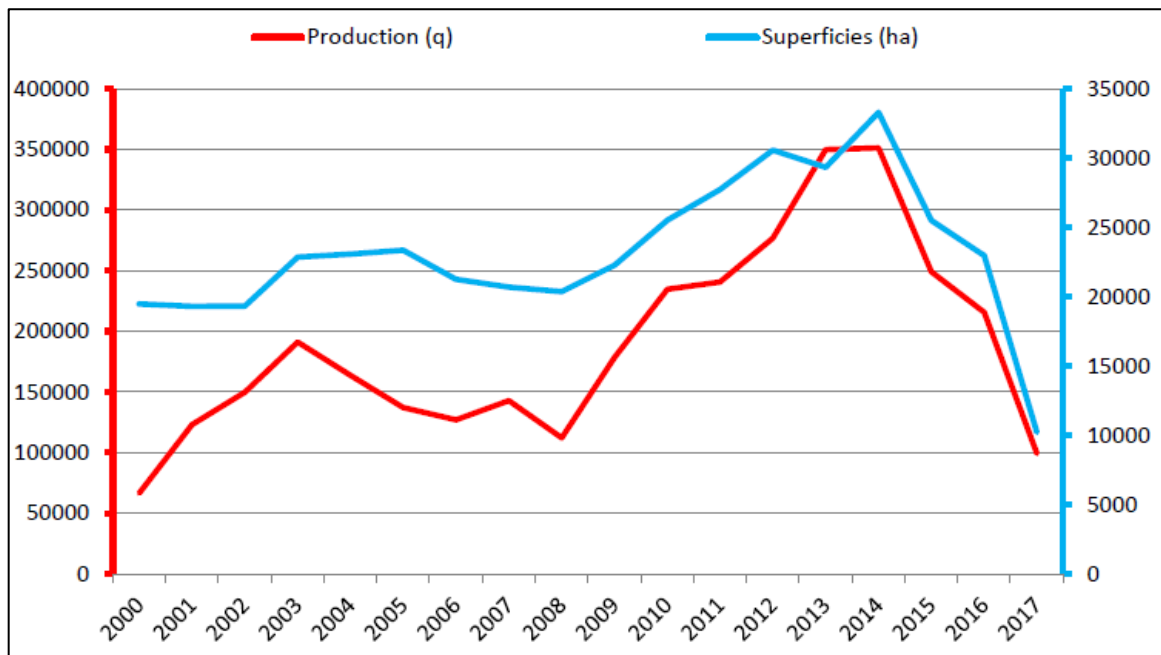


Figure 9. Evolution de la production et des superficies de pois chiche en Algérie entre 2000 et 2016. Source: (MADRP, 2017).

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 **Ficher** (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: interpréter les résultats des expériences, pré-évaluer des expériences de traitement longues et nombreuses, et être utilisés comme outils d'aide à la décision.

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 (3)

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \dots\dots\dots(3)$$

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 (Tr) et l'évaporation du sol (Ev)

$$ET = Tr + Ev \dots\dots\dots(4)$$

- 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 (Tr) 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)

$$Y = HI * B \dots\dots\dots(5)$$

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

$$B = WP * \sum Tr \dots\dots\dots(6)$$

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

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 de scénarios (**Steduto et al., 2009; Hsiao et al., 2009**). Les

concepts de base et les procédures de calcul fondamentales d'AquaCrop sont résumés dans l'organigramme présenté à la figure 3 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 et **enfin** les conditions initiales du sol.

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).

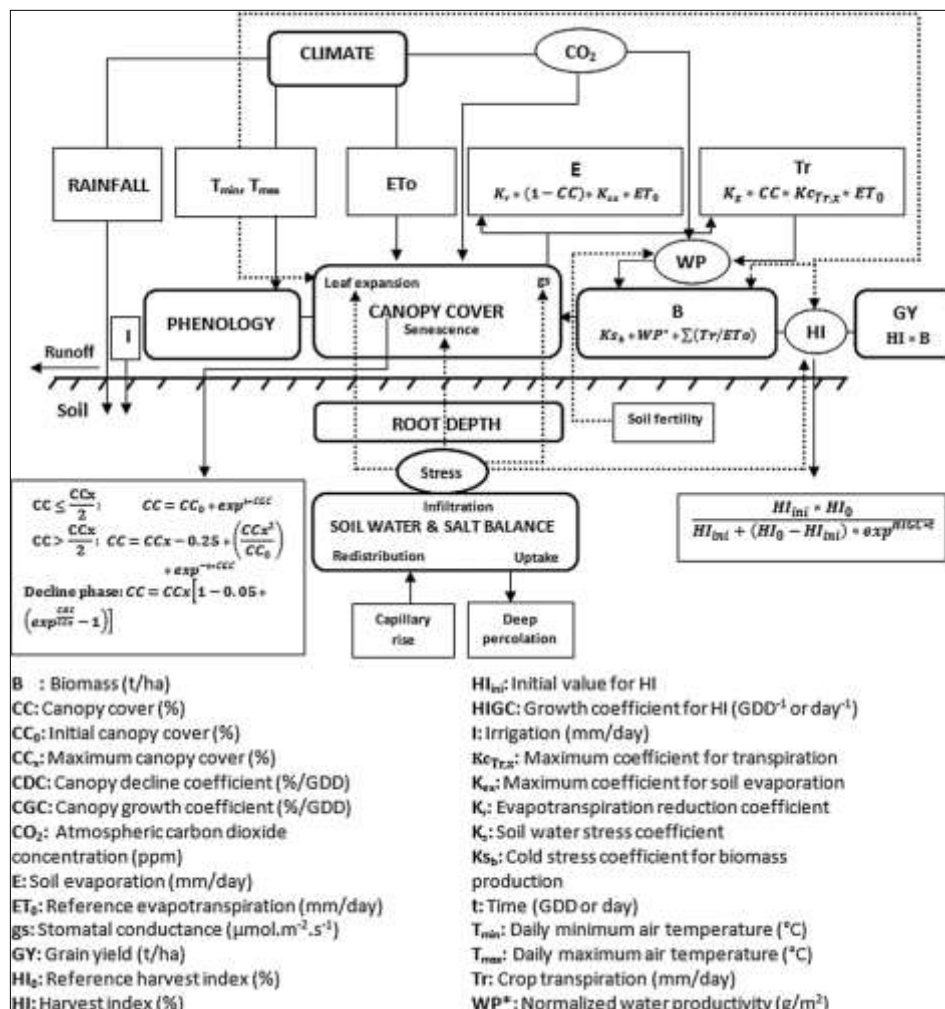


Figure 10. Schéma d'AquaCrop présentant les composants principaux du continuum sol-plante-atmosphère et les paramètres caractérisant la phénologie, la couverture de la canopée, la transpiration, la production de biomasse et le rendement final

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. Les critères utilisés sont :

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.

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%.

$$NRMSE(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \times \frac{100}{O_{avg}} \dots\dots\dots(7)$$

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 and 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.

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \dots\dots\dots(8)$$

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 and 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.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - o_{avg})^2} \dots\dots\dots(9)$$

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.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|s_i - o_{avg}| + |o_i - o_{avg}|)^2} \dots\dots\dots(10)$$

Matériels & Méthodes

1. Contexte du travail

- **Le projet SEMIARID**

Ce travail a été mené dans le cadre du projet **SEMIARID** 2017-2020 (Sustainable and Efficient Mediterranean farming systems : Improving Agriculture Resilience through Irrigation and Diversification) dont l'ENSA est partenaire. En utilisant l'approche d'analyse intégrée multi-échelles et multi-domaines, ce projet a pour but d'évaluer la résilience des systèmes de production agricole dans la méditerranée en relation avec leur diversité des cultures, la gestion de l'eau, afin d'évaluer s'ils peuvent maintenir un haut niveau de productivité et de fourniture des services éco-systémiques face aux changements/chocs climatiques et socio-économiques.

2. Présentation de site expérimental

L'essai a été réalisé au niveau de la station de l'ITGC Oued Smar à Alger (figure 11), entre Décembre et Juin 2019. Située à une latitude de 36°42 Nord, longitude 3°09Est et à une altitude de 20 m, cette station fait partie de Nord-Est de la plaine de Mitidja. La station de l'ITGC Oued Smar est considérée comme une ferme de démonstration et production de semences pré-base et base, en plus de ses activités d'expérimentation sur les pratiques et les techniques culturales dans le domaine de grandes cultures. Elle s'étend sur une superficie de 47 ha.



Figure 11. Localisation de site expérimental, Source : Google Earth (modifiée).

3. 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 de l'ONM. Les mesures prises, à un pas de temps mensuel, 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/m^2) 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).

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

Pour donner les caractéristiques du sol, un profil pédologique a été effectué sur une profondeur d'un mètre, il comprend un horizon dont les analyses physico-chimiques ont été réalisées au niveau du laboratoire de physique et chimique du sol du département de pédologie de l'ENSA.

5. Mise en place de l'essai

5.1. Le dispositif expérimental

L'essai a été réalisé en plein champ. Le dispositif utilisé est un Bloc aléatoire complet (factoriel) à deux facteurs étudiés de même importance et à trois répétitions:

- Facteur 1 : **type de culture** avec trois modalités : monoculture blé dur (B), monoculture pois chiche (P) et l'association blé dur-pois chiche (I).
- Facteur 2 : **dose d'azote** avec trois modalités: 30 unité/ha (D1), 60 unité/ha (D2) et 100 unité/ha (D3).

Ce qui fait un total de 9 traitements (micro-parcelles) par bloc.

Chaque micro-parcelle est un rectangle de 10 m de longueur et 2.5 m, avec une distance entre micro-parcelles de 1 m horizontalement et 2 m verticalement. Une bande de 2 m est laissée tout autour la parcelle pour éviter l'effet bordure. Les dimensions de la parcelle sont 38 m en longueur et 34.5 m en largeur, soit une superficie totale de 1311 m² (**figure 12**).

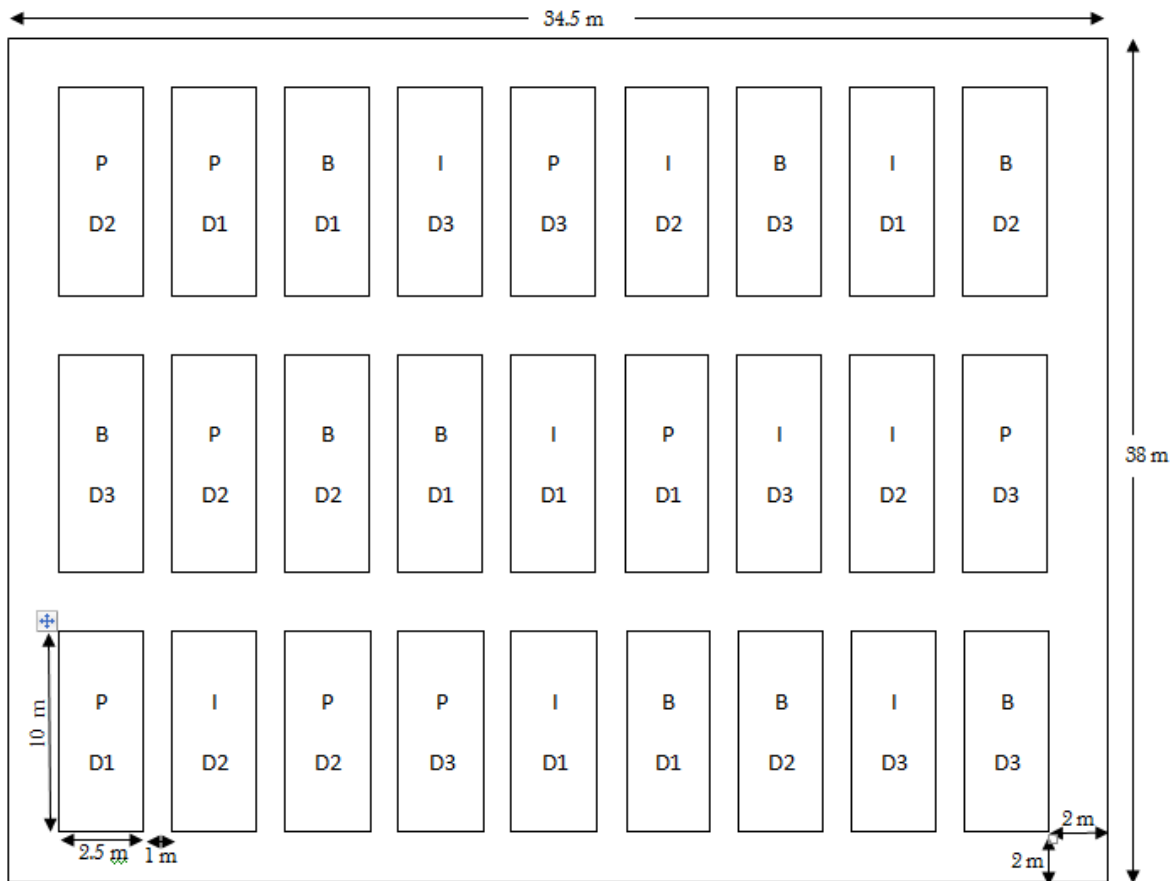


Figure 12. Schéma illustratif du dispositif expérimental.

5.2. Matériel végétal

Une variété largement cultivée en Algérie « Vitron » a été choisie pour le blé dur. C'est une obtention du CIMMYT (Mexique) et largement cultivée en Espagne. Elle a été introduite en Algérie par l'ITGC en 1986 et sélectionnée au niveau de la station expérimentale de Tiaret (**Hammadache *et al.*, 2002**). C'est une variété semi-précoce, assez sensible à la rouille brune. Elle est productive et présente un épi fertile et un gros grain (**I.T.G.C, 1998**). elle est rapportée tolérante à la sécheresse dans l'étude de **Larbi *et al.*, (2000)**.

Pour le pois chiche, une variété nommée Seraidi ou « Flip 90-13 C » issue de la collection de semences de la station de l'ITGC Constantine a été choisie. C'est une variété de type Kabuli, à port semi-érigé, semi-tardive, et tolérante à l'antracnose (**I.T.G.C, 2018**).

6. Suivi des humidités du sol

6.1. Méthode gravimétrique

Un prélèvement par micro-parcelle a été réalisé aléatoirement dans les couches : 0-10, 10-20 ; 20-40 ; 40-60 ; 60-80 et 80-100 cm, afin de suivre la dynamique verticale de l'eau sous les différents traitements. Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une carottière modifiée pour ce travail (figure 13). Les échantillons sont pesés en frais puis en sec après passage à l'étuve (à 104 °C pendant 24 h) pour déterminer l'humidité pondérale (W) qui est ensuite convertie en humidité volumique (Θ) :

$W = M_{\text{eau}} / M_{\text{sol}}$; $\Theta = W \cdot d_a$ Où M_{eau} et M_{sol} sont la masse d'eau et de sol sec d'un échantillon respectivement; d_a est la densité apparente.



Figure 13. Tarière utilisée pour l'échantillonnage du sol.

Il est à noter que les bilans hydriques calculés par la méthode citée auparavant servent à comparer le bilan hydrique simulé par le modèle AquaCrop afin de vérifier la fiabilité de celui-ci.

6.2. Simulation du bilan hydrique par le modèle AquaCrop

D'une manière schématique, la zone racinaire peut être considérée comme un réservoir d'eau (figure 14). En additionnant les flux d'eau entrants (pluviométrie, irrigation et remontée capillaire) et sortants (ruissellements, évapotranspiration et percolation profonde)

aux limites de la zone racinaire, la quantité d'eau retenue dans la zone racinaire et l'épuisement en eau de la zone racinaire peuvent être calculée à chaque moment de la saison à travers le bilan d'eau du sol.

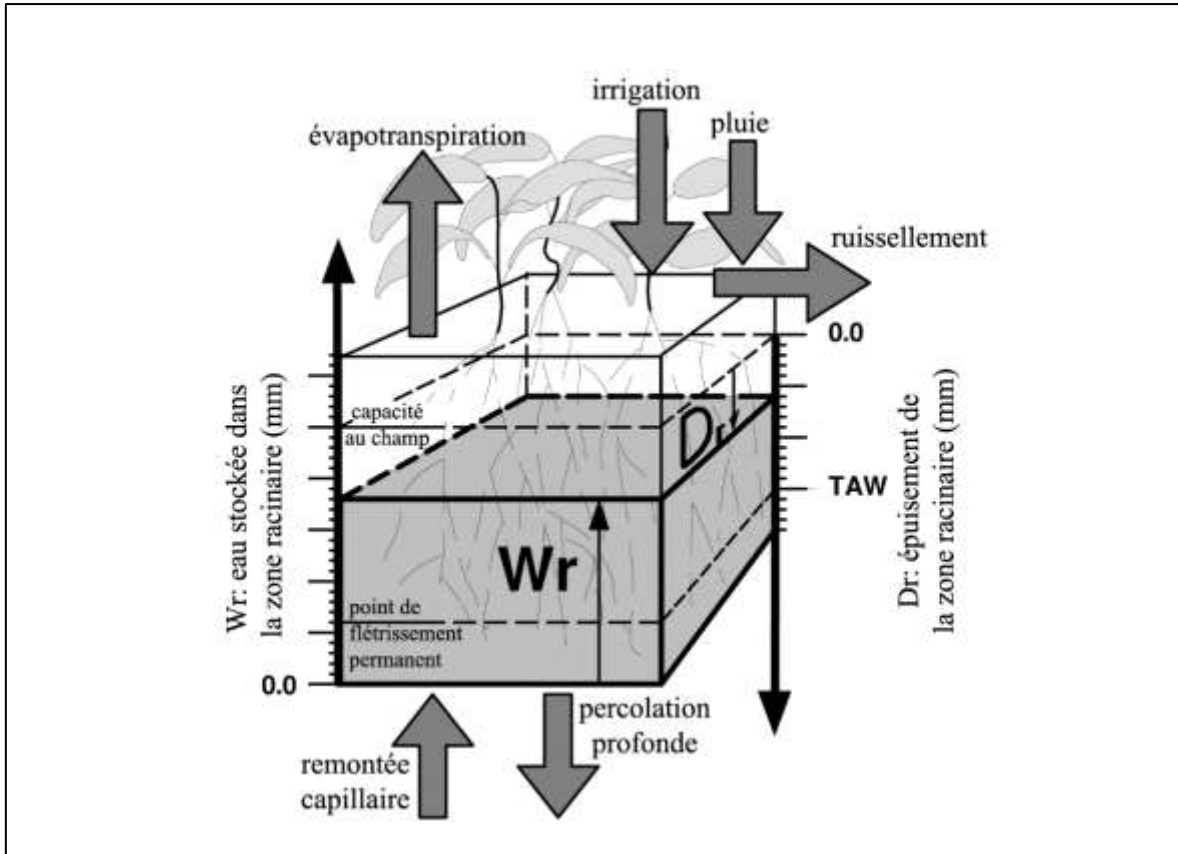


Figure 14. Les flux du bilan hydrique

Il est noté que le modèle Aquacrop ne s'adapte pas pour les cultures légumineuses et associations, dans cette étude, le modèle est appliqué pour les micro-parcelles de blé dur. Il s'agit de simuler les bilans hydriques des cultures de blé dur et de les comparer par la suite par ceux mesurés par la méthode gravimétrique.

Résultats & Discussions

1. Analyse des données climatiques

1.1. Pluie et évapotranspiration

Les variations de précipitations et de l'ET₀, sont montrées par la figure 15. Ces variations illustrent la répartition des pluies durant la période de l'expérimentation (déc. 2019 - juin 2020). Le cumul pluviométrique reçu, entre septembre et aout, est de l'ordre de 439 mm. Celui qui correspond à la saison d'expérimentation est de 238 mm. L'évapotranspiration potentielle annuelle correspondante est de l'ordre de 1066 mm. Celle correspondante à la saison de culture est de 552,77 mm.

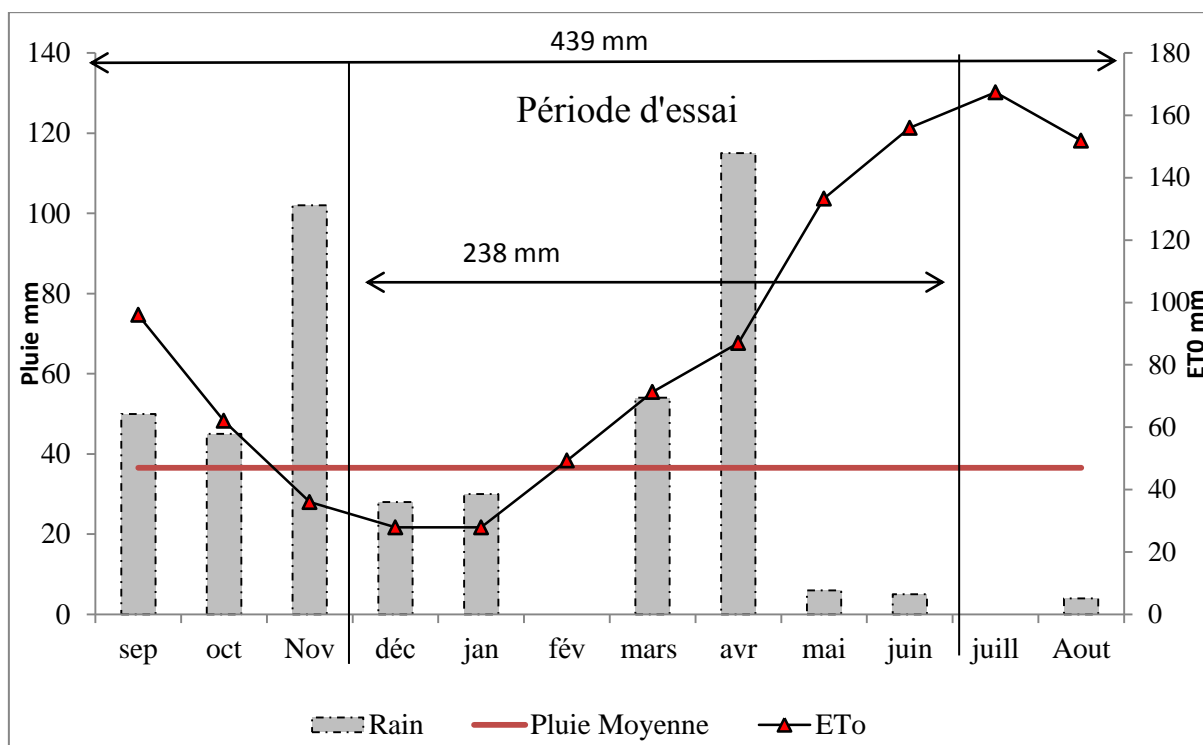


Figure 15. Précipitations, évapotranspiration potentielle (ETP) à l'échelle mensuelle pour la période d'essai.

1.2. Températures

Les relevés moyens mensuels des températures moyennes enregistrées sur la période d'étude sont présentés dans la figure 16. D'après cette figure, il est constaté que la moyenne mensuelle du mois le plus froid est de 5,1 °C et celle du mois le plus chaud est de 33,9 °C, elle correspond, respectivement, pour le mois de janvier et aout.

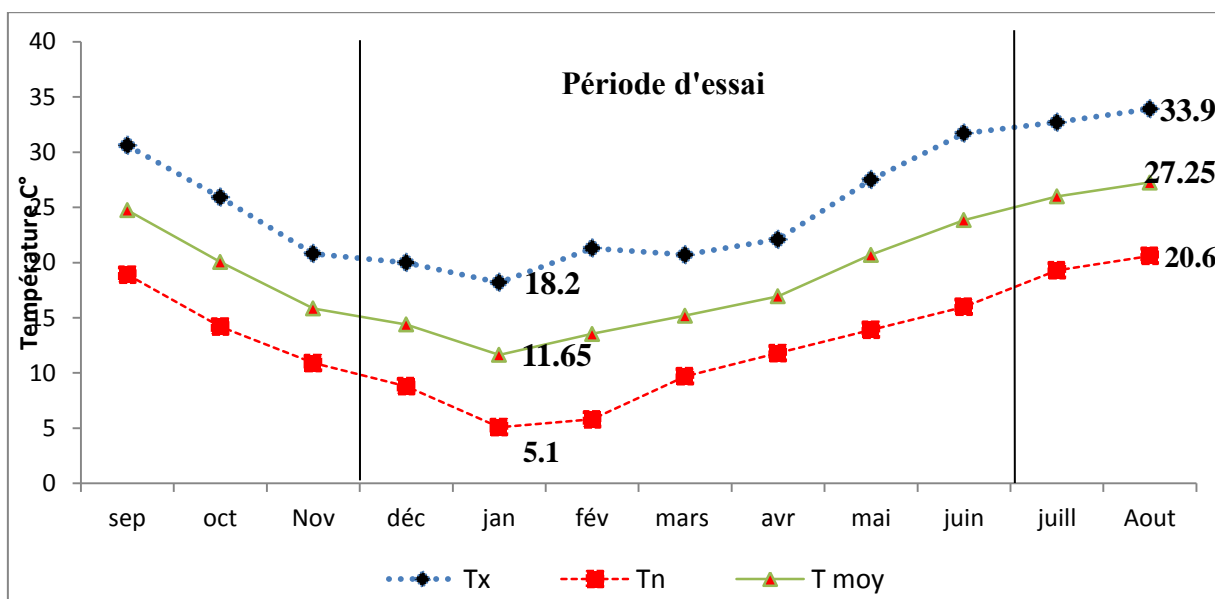


Figure 16. Variations des températures moyennes, minimales et maximales durant le cycle de culture.

1.3. Humidité relative

L'humidité relative de l'air est un élément du cycle hydrologique qui contrôle l'évaporation du sol et le couvert végétal. L'humidité moyenne mensuelle pour la période d'étude est illustrée par la figure 17.

Il est constaté que le mois le plus humide est le mois avril avec 81,08 %, par contre le mois le moins humide coïncide avec le mois octobre (69,80 %).

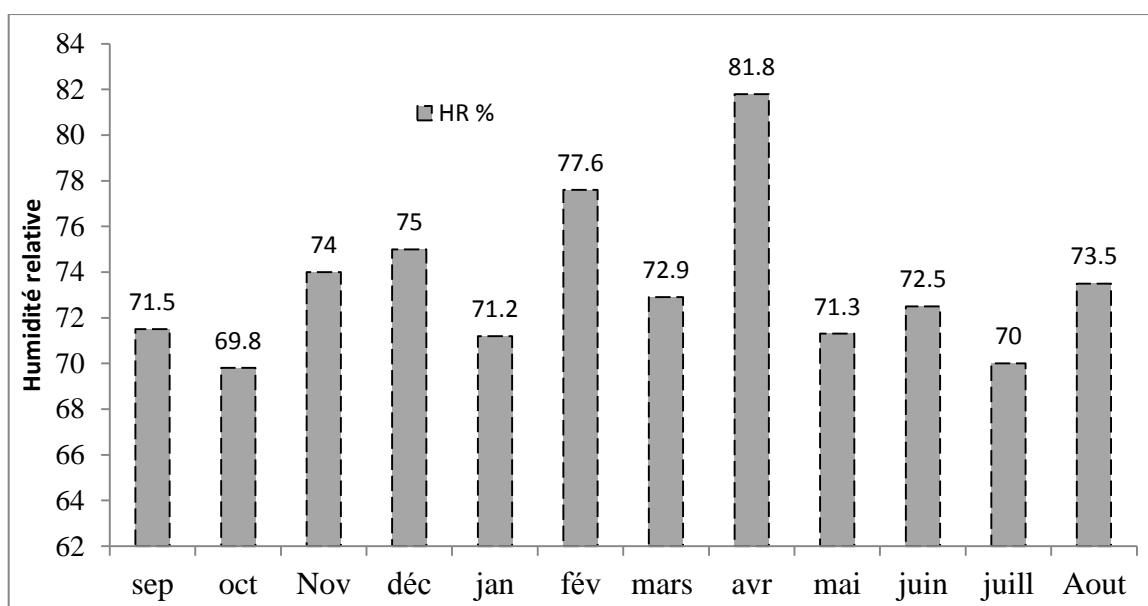


Figure 17. Variation de l'humidité moyenne mensuelle durant la période de l'essai

1.4. Vitesse du vent

Il s'agit d'un facteur important aussi bien sur un plan agronomique que du point de vue de l'aménagiste puisque il reste un élément déterminant dans le choix de type d'irrigation. La figure 18 montre les tendances de la vitesse du vent, elle représente la vitesse moyenne maximale du vent en juin (1,4 m/s), et la vitesse minimale, vitesse observée en septembre (0,3 m/s).

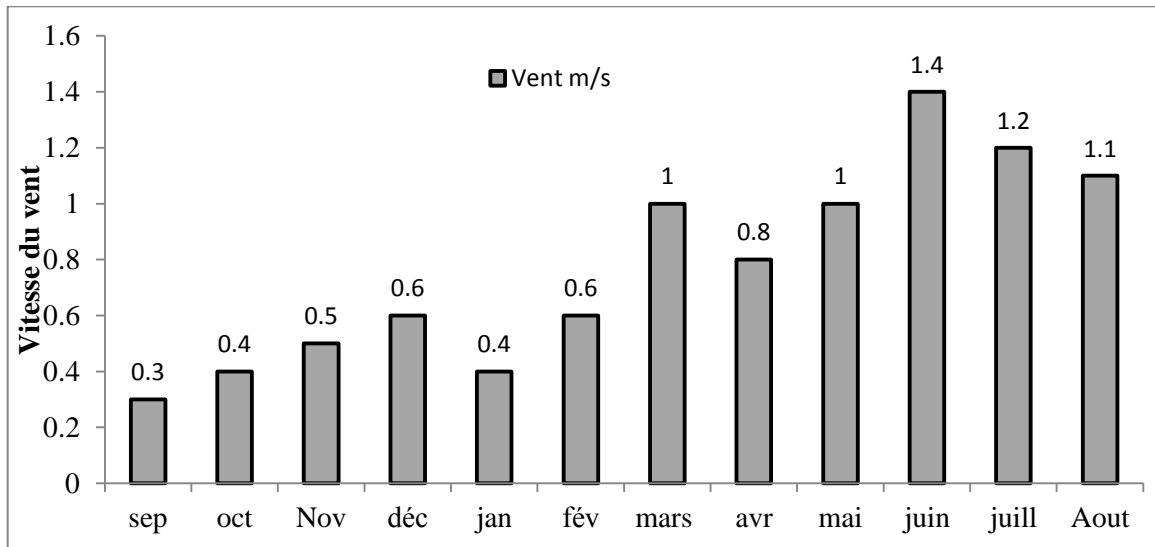


Figure 18. Variation de la vitesse moyenne mensuelle durant a période de l'essai

1.5. Insolation

La figure 19 illustre la variation de la durée d'ensoleillement durant la période d'étude, il est constaté que l'ensoleillement maximum est en mois de juillet (10,71 h) la durée minimum est en mois de novembre (5,43 h).

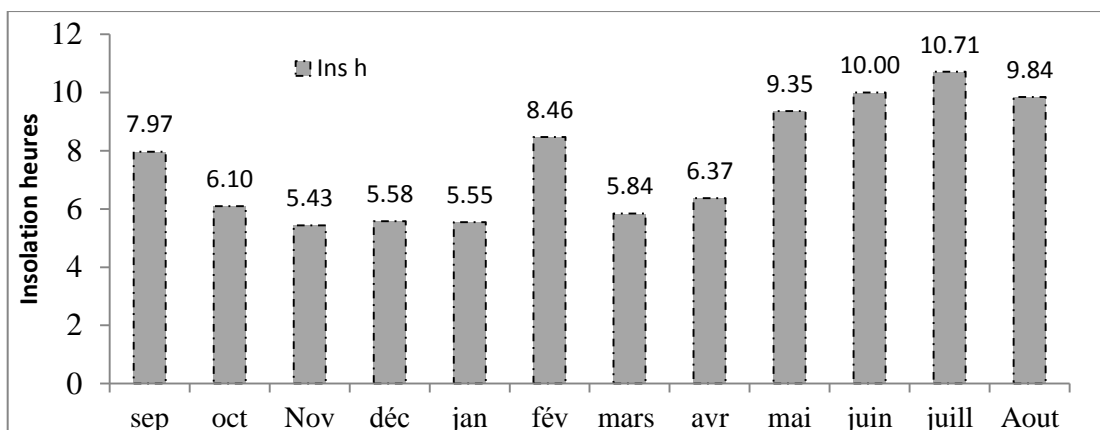


Figure 19. Variation de l'insolation moyenne mensuelle durant a période de l'essai

2. Evaluation des profils hydriques

2.1.1. Humidité volumique

La figure 20 illustre la variation des humidités volumiques entre les deux cultures et le long de leurs cycles végétatifs. Il est constaté que les humidités volumiques sont légèrement différentes entre les doses pour les deux cultures. Par contre une différence de celles-ci remarquable entre les deux cultures. Elles sont variées de 15 à 34 % pour le pois chiche et de 20 à 40 % pour le blé dur.

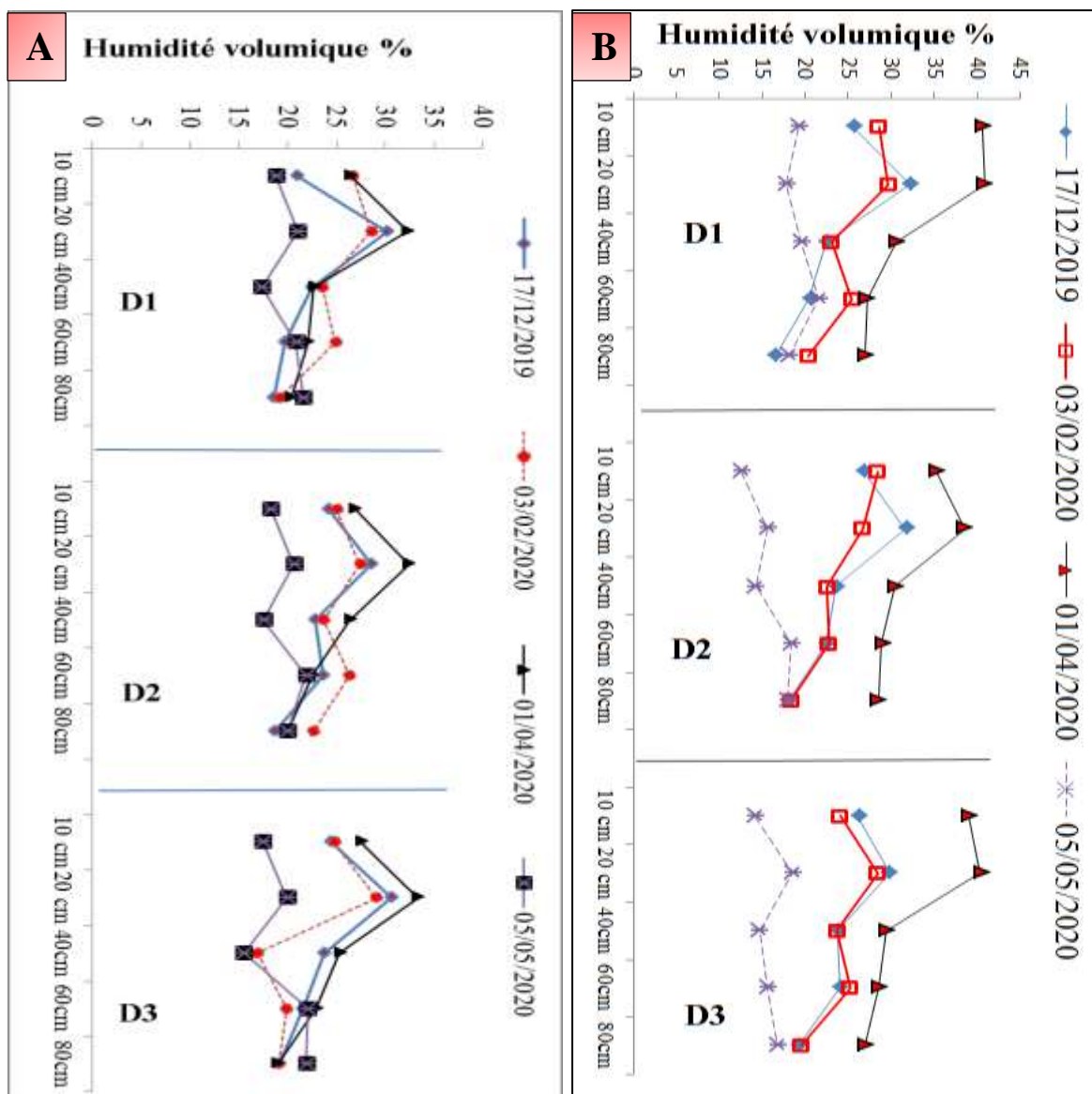


Figure 20. Profils hydriques (A :Pois chiche ; B : blé dur)

2.1.2. Stock d'eau

On détermine le stock d'eau par simple sommation des humidités volumiques aux différentes profondeurs considérées :

$$S = \int \theta_v dz \dots\dots\dots (14)$$

Le stock d'eau est exprimé en mm

La figure 21 montre les fluctuations des stocks d'eau en mm entre les deux cultures et le long de leurs cycles végétatifs. Nous constatons que les stocks d'eau entre les doses pratiquées pour les deux cultures est presque identiques. Par contre une différence marquée entre les stocks d'eau pour les deux cultures (blé dur et pois chiche).

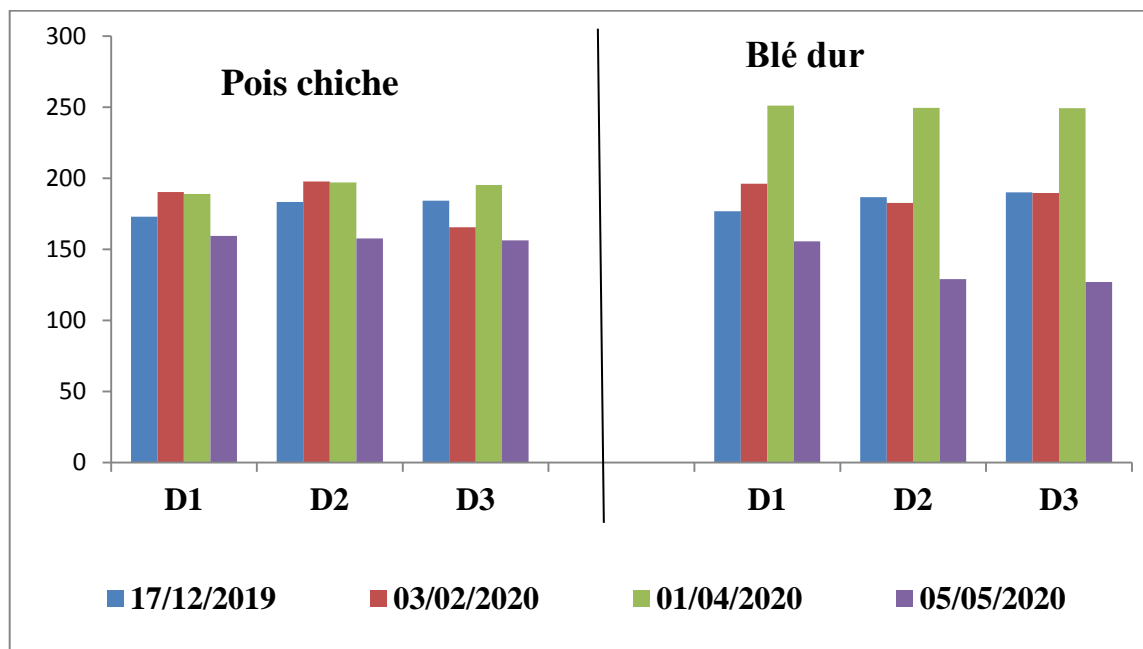


Figure 21. Teneur en eau à l'horizon 0.8 m

3. Simulation du bilan hydrique par le modèle AquaCrop

La figure 22 illustre la variation de la teneur en eau totale dans l'horizon 0,80 m mesurée sur le champ et simulée par le modèle Aquacrop pour les micro-parcelles du blé dur, car le modèle Aquacrop s'adapte uniquement pour les cultures céréalières, maraichères et les cultures feuilles. Par contre ne s'adaptent pas pour les cultures légumineuses et associations.

La comparaison graphique et les résultats statistiques montrent que la teneur en eau du sol a été modélisée de manière satisfaisante pour la période d'expérimentation dont le *nRMSE*

est de l'ordre de 14,8 % ; d est de 0,81; $RMSE$ est de l'ordre de 27,6 mm (tableau 7). 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 la teneur en eau (SWC). 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.

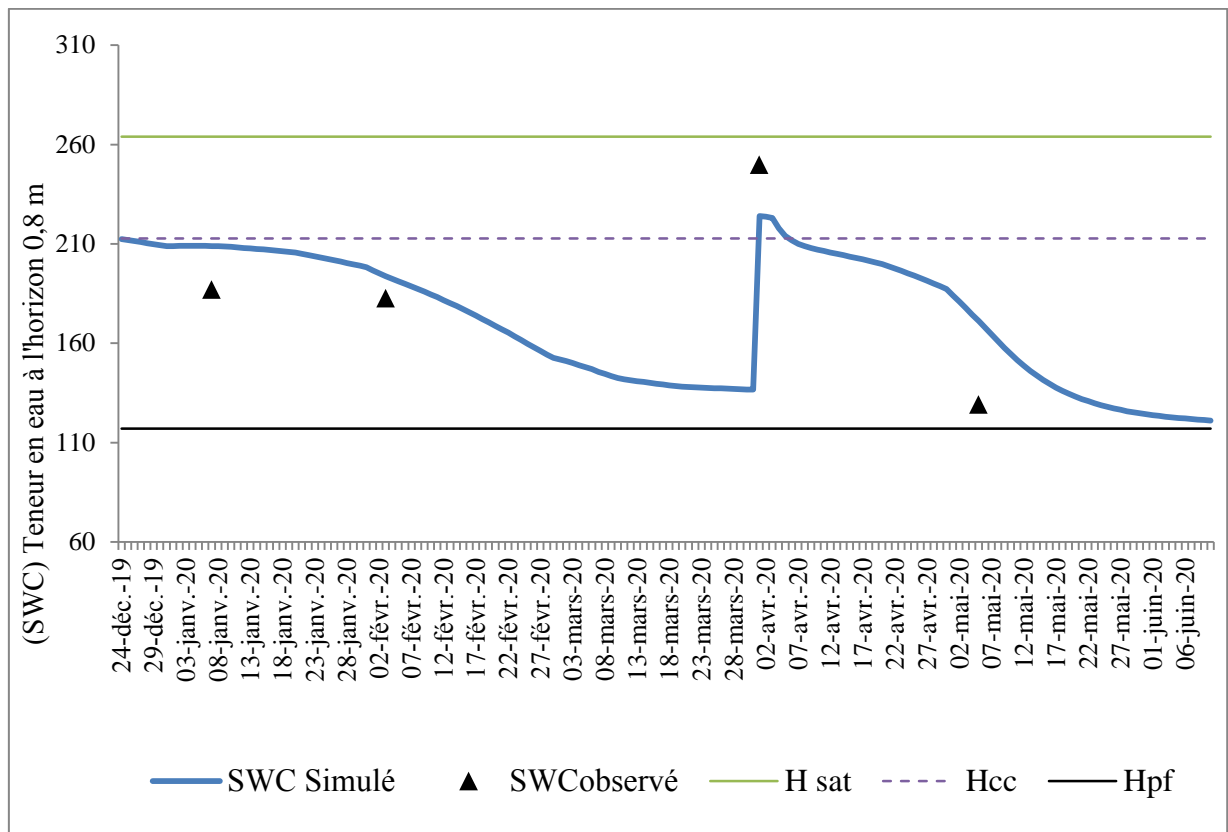


Figure 22. Teneur en eau observée comparée à la teneur en eau simulée pour la saison de croissance

Le tableau 7 montre les teneurs en eau simulées par le modèle Aquacrop et celles mesurées par la méthode gravimétrique.

Tableau 7. Indicateurs de la qualité de l'ajustement de la teneur en eau

| | Teneur en eau mm | | | |
|-----------------|------------------|----------|------|--|
| | Simulée | Mesurée | | |
| 07 janvier 2020 | 208,9 | 186,8 | | |
| 03 février 2020 | 193,8 | 182,5 | | |
| 01 avril 2020 | 224 | 249,8 | | |
| 05 mai 2020 | 171,1 | 129,1 | | |
| Moyenne | 199,5 mm | 187,1 mm | | |
| RMSE | nRMSE | EF | d | |
| 27,6 mm | 14,8 % | 0,58 | 0,81 | |

Conclusion générale

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de répondre à notre objectif principal qui consistait à tester la fiabilité du modèle AquaCrop à simuler les bilans hydriques. Et ce, par la comparaison es bilans hydriques simulés avec ceux mesurés via la méthode gravimétrique. L'analyse statistique a montré que le modèle AquaCrop a bien simulé les bilans hydriques durant le cycle de développement de la culture de blé dur.

L'essai réalisé en plein champ a permet d'évaluer le niveau de compétition et de complémentarité entre les deux espèces cultivées pois chiche et blé dur sous un gradient de fertilisation azotée.

Les résultats obtenus ont montré clairement au cours du présent travail l'avantage de l'association en matière de facilitation de la croissance plus particulièrement pour le blé dur sous des faibles doses d'engrais azoté. Cette facilitation s'est exprimée principalement par une meilleure accumulation de biomasse et une meilleure absorption de l'eau,

Ces résultats suggèrent l'avantage du blé dur en bénéficiant de la fertilisation azotée grâce à sa croissance plus rapide que le pois chiche aux premiers stades de la culture, et par conséquent une meilleure absorption d'eau.