

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش- الجزائر

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de magister en sciences agronomiques

Département : Génie Rural

Spécialité : Hydraulique Agricole

THEME

**Evaluation d'un modèle à réservoirs pour simuler le bilan
hydrique d'un blé dur dans la région d'Adrar**

Présenté par : **BENCHEIKH Abdelaali**

Soutenu le : 12/07/2010

Jury :

Président : M. AIDAOUI A.

Professeur (ENSA) Alger

Promoteur : M. MEDDI M.

Professeur (ENSH) Blida

Examineurs : M. MOUHOUCHE B.

Maitre de conférences (ENSA) Alger

M. CHABACA M. N.

Maitre de conférences (ENSA) Alger

Année universitaire : 2009/2010

Dedicaces

Dédicace

Je dédie ce travail:

*A la prunelle de mes yeux, celle qui m'a soutenu jour et nuit
pour qu'elle me voit toujours au sommet et comme une étoile*

filante: A toi ma chère mère.

A vous mes chers parents, le déluge d'amour éternel et les sacrifices symbolique

A mes frères et sœurs,

*A toute la famille **BENCHEIKH.***

A Tous mes amis

*A tous mes frères de la cité universitaire **BOURAOUI A.***

A tous ceux que j'aime

ABDELAALI

Remerciement

Tout d'abord je remercie Allah tout puissant pour le courage et toute la patience qu'il m'a donné pour surmonter toutes les difficultés rencontrées durant tout mon cursus scolaire et universitaire.

Je tiens à exprimer ma gratitude au directeur de cette thèse M. MEDDI M. professeur à l'école National Supérieure de l'hydraulique de BLIDA d'avoir accepté de m'encadrer et aussi pour sa disponibilité, sa patience, sa gentillesse et également pour ses conseils qui m'ont permis d'achever ce travail.

J'adresse mes remerciement à M. AIDAOUI A. professeur à l'école national supérieur agronomique d'avoir accepté de présider le jury.

Je tiens à remercier également, M. MOUHOUCHE B. et M. CHABACA M. N., maîtres de conférences à l'école nationale supérieure agronomique, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier M. LAABOUDI A. chargé de recherche à la station expérimental de l'institut national de la recherche agronomique INRAA Adrar. Et tous les personnels de la station.

Je tiens à remercier M. SELLAM F. pour ces aides sur les procédures de l'utilisation du modèle.

Je remercie profondément mon père et mes frères pour leurs soutiens.

Je remercie mes amis: Khaled, Fateh, Tahar, Med Said, Arezki, Othmane, Sans oublier tous les membres de RIM, TIMIMOUN pour ces efforts surtout : Dari, Salem et Othmane.

Je tiens à remercier tous ce qui ont contribué à ce travail de près ou de loin et tous mes camarades de l'ENSA ex-INA qui mon soutenu tout au long de mon cursus.

Merci à tous Abdelsaafi

Sommaire

Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Liste des abréviations	xi
Introduction général	01
Chapitre I : La modélisation du bilan hydrique	
I.1 Principe du Bilan Hydrique :	04
I.2 Equation du bilan hydrique :	05
I.3 Gestion du bilan hydrique :	06
I.4 Détermination de différents paramètres de bilan hydrique :	06
I.5 La modélisation du bilan hydrique :	08
I.5.1 Généralités :	08
I.6 But de La modélisation du bilan hydrique:.....	09
I.7 Bilan hydrique simulé selon le concept RU :	09
I.7.1 Réservoir sol :	10
I.7.2 Limites du bilan hydrique simulé :	10
I.8 Différentes modèles de bilan hydrique :	11
I.8.1 les modèles simples à réservoirs :	11
I.8.2 Modèles mécanistes complexes :	11
I.8.3 Intérêt et limites de deux types des modèles :	12
I.9 Les modèles à réservoirs (conceptuels) :	12
I.9.1 Principe de fonctionnement :	12
I.9.2 Application des modèles à réservoirs :	13
I.9.3 Choix du modèle à utiliser :	13
I.10 Présentation du STICS :	13
I.10.1 Généralité :	13
I.10.2 Organisation en modules et optionalité :	15
I.10.3 Bilan hydrique :	16
I.10.4 Intérêt et limites :	18
Intérêt :	18
Limites :	18
I.10.5 Les fichiers de sorties :	18
I.11 Evaluation de la robustesse d'un modèle :	19
I.12 Critères statistiques utilisés pour évaluer le modèle STICS :	20
I. 13 Limitations :	22

Conclusion :	22
--------------------	----

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1 Situation géographique :	23
II.2 Climatologie :	23
II.2.1 La température :	23
II.2.2 La pluviométrie :	24
II.2.3 Le vent :	24
II.2.4 L'évaporation :	24
II.2.5 Humidité relative :	25
II.2.6 Insolation :	25
II.2.7 Synthèse climatique :	26
II.2.7.1 Climagramme d'Emberger et étage bioclimatique :	26
II.2.7.2 Diagramme ombrothermique de Gaussen :	26
II.3 L'agriculture dans la wilaya d'Adrar :	26
II.3.1 La céréaliculture :	27
II.3.2 Rendements :	27
II.3.3 Production en céréales :	28
II.4 Les contraintes limitant la production de la céréale dans le sud Algérien :	29

Chapitre III: Matériel et méthodes

III.1 Site expérimental :	30
III.2 Conditions expérimentales :	30
III.2.1 Conditions climatiques :	30
III.2.2 Conditions édaphiques :	30
III.3 matériel végétal :	32
III.4 gestion de l'essai.....	32
III.5 Mise en place de la culture :	33
III.5.1 Le semis :	33
III.5.2 La fertilisation :	33
III.5.3 Irrigation :	33
III.6 Les paramètres étudiés :	34
III.6.1 Les paramètres climatiques :	34
III.6.2 Humidité du sol :	34
III.6.3 Mesure de la densité apparente :	35
III.6.4 Potentiel hydrique du sol :	35

III.6.4.1 Fréquence d'observation des tensiomètres :	36
III.6.4.2 Préparation du tensiomètre :	36
III.6.5 Mesure de drainage :	37
III.6.6 Mesures agronomiques :	37
III.6.7 Mesure de l'évapotranspiration maximale.....	38

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Caractéristiques climatiques :	39
IV.2 Le développement végétatif :	39
IV.3 Caractéristiques hydriques du sol :	39
IV.3.1 La capacité au champ notée Hcc :	40
IV.3.2 Le point de flétrissement permanent noté H _{pf} :	40
IV.3.3 La réserve utile notée RU:	40
IV.3.4 La courbe de rétention :.....	41
IV.4 Analyse de la cinétique hydrique du sol :.....	41
IV.4.1 Profil hydrique :.....	42
a. du semis à la reprise :	42
b- La reprise ou début de floraison :	42
c- La fin de floraison à la maturation :	43
IV.4.3 Stock d'eau :	45
IV.5 Potentiel hydrique :	46
IV.6 Le bilan hydrique de la culture de blé :	48
IV.6.1 Evapotranspiration potentiel :	49
IV.6.2 Evolution journalière de l'ETM :	50
IV.6.3 ETM moyenne journalière et cumulée :	50

Chapitre V : Simulation des différents paramètres de bilan hydrique

V.1 Calage du modèle :	54
V.2 Paramètres climatiques :	55
V.3 Les paramètres liés au sol :	55
V.4 Les paramètres propres à la plante :	55
V.5 Les paramètres techniques :	56
V.6 Calage de LAI :	56
V.7 Validation du Modèle :	57
V.8 Simulation de développement du blé dur :	58
V.9 Simulation des différents paramètres du bilan hydrique :	58
V.9.1 Evolution du stock :	58

V.9.2 Confrontation entre réserves simulés et observés :	60
V.9.3 Simulation des évapotranspirations :	60
V.9.4 Simulation des irrigations :	62
V.9.5 Simulation de drainage :	63
V.9.6 Simulation des humidités :	64
V.9.7 Evaluation statistique :	65
Conclusion générale	66

Liste des tableaux

Tableau 01 : les intérêts et les limites des modèles à réservoirs	12
Tableau 02 : moyennes des précipitations période 1980-2008	24
Tableau 03 : évaporation mensuelle enregistrée dans la région d'Adrar en 2008	25
Tableau 04 : Moyenne mensuelle d'humidité relative en 2008	25
Tableau 05 : insolation (heures) mensuelle d'Adrar pour l'année 2008	25
Tableau 06 : répartition des surfaces irriguées dans la wilaya d'Adrar	27
Tableau 07 : Rendement moyenne de différentes céréales	28
Tableau 08 : Production en céréales pour la campagne 2007/2008	28
Tableau 09 : Surface réservé à la céréale pour quatre campagnes (2003-2007)	29
Tableau 10 : Caractéristiques physico-chimiques du sol	30
Tableau 11 : les paramètres climatiques : station INRA Adrar (2008)	31
Tableau 12 : les doses moyennes en fonction des stades végétatifs	34
Tableau 13: suivi des stades phénologiques de la culture	37
Tableau 14 : bilan hydrique du blé dans la région d'Adrar	38
Tableau 15 : valeurs de l'ETM du blé en fonction des stades végétatifs	50
Tableau 16 : évolution du Kc du blé en fonction des stades végétatifs	52
Tableau 17 : Les paramètres liés au sol	55
Tableau 18 : les valeurs cumulées des évapotranspirations	61
Tableau 19 : irrigations apportés et mesurés	62
Tableau 20 : efficacité des apports et des consommations d'eau (mesuré et simulé)	63
Tableau 21 : évaluation statistique des simulations des humidités pondérales par horizon, RRMSE, le coefficient de corrélation (R^2) et l'efficacité du modèle.	65

Liste des figures

Figure 01 : le principe du bilan hydrique	05
Figure 02: Fonctionnement d'un réservoir sol	10
Figure 03 : Organisation générale du modèle agronomique STICS	15
Figure 04 : Structure modulaire de STICS.	16
Figure 05: schéma du système drainant considéré	17
Figure 06 : Situation géographique de la wilaya d'Adrar	23
Figure 07 : Les moyennes mensuelles des températures moyennes	24
Figure 08 : moyenne mensuelle d'évaporation (2008) dans la région d'Adrar	26
Figure 09 : Diagramme ombrothermique de Gaussen de la région d'Adrar 2008	27
Figure 10 : dispositif expérimental	32
Figure 11 : vue de site expérimental	33
Figure 12 : position des tensiomètres	36
Figure 13 : tensiomètre avec manomètre	36
Figure 14 : courbe de rétention hydrique ajustée des cinq profondeurs	41
Figure 15 : évolution du profil hydrique du semis jusqu'à la reprise	42
Figure 16 : évolution du profil hydrique pour la période de la reprise à la floraison	43
Figure 17 : le profil hydrique pour le période de floraison à la maturité	43
Figure 18 : Le profil hydrique à l'intérieur du lysimètre	44
Figure 19: Le profil hydrique à l'extérieur du lysimètre	45
Figure 20 : variation de stock durant la campagne	45
Figure 21 : évolution de la tension du sol pour les horizons superficiels	46
Figure 22 : évolution de la tension du sol pour les horizons profonds	46
Figure 23 : évolution des différents paramètres du bilan hydrique du blé dur dans la région d'Adrar	49
Figure 24: Evolution de l'ETP durant l'essai	49
Figure 25 : Evolution des ETP et ETM cumulé durant le cycle	51
Figure 26 : Evolution du Kc en fonction du stade de développement végétatif du blé	53
Figure 27 : calage du LAI	56
Figure 28 : relation entre LAI mesuré et LAI simulé	57
Figure 29 : évolution du stock simulé et observé	59
Figure 30 : confrontation entre les réserves simulées et mesurées	60

Figure 31 : évolution journalier des évapotranspirations	61
Figure 32 : évolution des drainages simulé et observés	63
Figure 33 : profils d'humidité simulés et observés	64

Liste des abréviations

θ : Teneur en eau volumique densité volumique [$\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$]

\bar{Y}_j : Valeur moyenne de la variable j

Y_{ij} : Valeur observée n° i de la variable j

\hat{Y}_{ij} : Valeur simulée n° i de la variable j

ρ_w : Masse volumique de l'eau

Ψ : Potentiel total

Ψ_g : Le potentiel gravitaire

Ψ_m : Le potentiel matriciel

Ψ_o : Le potentiel osmotique

Atm : Atmosphère ;

Da : Densité apparente du sol ;

Dj : Drainage (mm) ;

DSA : Direction de services agricoles

EF : L'efficience du modèle

ET : l'évapotranspiration (mm)

ETM : Evapotranspiration maximale (mm)

ETo : L'évapotranspiration de référence (mm)

ETP : L'évapotranspiration potentielle (mm)

ETR : L'évapotranspiration réelle (mm)

FDR : Réflectomètres de domaine de champ

h : Tension matricielle ou succion [mm].

Ha : Hectare

Hcc : La capacité au champ

Hpf : Le point de flétrissement

I : Irrigation (mm)

K (h) : Conductivité hydraulique [mm/s].

Kc : Coefficient cultural

MADR : Ministre de l'agriculture et le développement rural

MD : L'écart moyen

MWE : L'écart pondéré moyen

N : Nombre de variables ayant des observations

n_j : Nombre d'observations de la variable j

P : Précipitations (mm)

q : Flux d'eau ou vitesse de Darcy [mm.s^{-1}].

Q : Quotient pluviométrique d'Emberger

RDU : Réserve difficilement utilisable

RFU : Réserve facilement utilisable

RH(j-1) : La réserve hydrique au jour j-1 (mm)

RHj : La réserve hydrique au jour j (mm)

Rj : Ruissellement au jour j (mm)

RMD : L'écart relatif moyen

RMD : L'écart relatif moyen

RMSE : L'écart quadratique moyen

RRMSE : L'écart quadratique relatif moyen

RU : La réserve utile en eau d'un sol

TDR : Réflectomètres d'échelle de temps

THS : La teneur d'humidité dans le sol

W : La teneur en eau pondérale

Z : Profondeur d'enracinement en m.

ΔS : différence de stock en eau.

Introduction général

Introduction :

L'augmentation de la demande en eau par les différents usages, à savoir : les ménages, l'irrigation et l'industrie associée à la rareté des ressources hydriques dans notre pays ; dont le climat est caractérisé par des périodes de sécheresse de plus en plus accentuée constitue un déficit pour l'Algérie. Ne pas souligné la nécessité de prendre en compte les risques futures de pénurie, mais aussi de distribuer les ressources indispensables d'une manière optimale au présent, à moyen terme et à long terme.

La pénurie de l'eau continuera à être une vraie menace aux millions de personnes dans des zones arides et semi-arides. La croissance des populations et l'élévation dans le niveau de vie prévu, augmenteront la demande pour l'eau considérablement dans un proche avenir (**Droogers et al, 2000**).

L'agriculture irriguée représente une contribution importante à la sécurité alimentaire, produisant presque 40% de nourriture et de produits agricoles sur 17% de terres cultivées (**FAO, 2002 in Duchemin et al., 2008**). Par conséquent, elle consomme plus que 90% de l'eau dans les régions arides. Dans ces régions, la disponibilité de l'eau est en concurrence entre : l'agriculture, l'usage domestique, l'industrie, et les utilisations environnementales d'une façon relativement faible. Comme l'agriculture est généralement le plus gros consommateur d'eau, il est souvent proposé que l'eau puisse être mise à la disposition pour les autres utilisations en augmentant l'efficacité de l'irrigation par le biais d'investissements dans de nouvelles techniques d'irrigation. Malheureusement, cette position est souvent préconisée, sans connaissance de la façon dont a augmenté l'efficacité de l'irrigation est assurée et les implications plus larges de ce processus (**Alsharhan et Wood, 2003**).

Cependant, la gestion de ce précieux patrimoine n'est pas aussi facile, à cause de l'distribution aléatoire des apports naturels, un risque de défaillance est toujours lié aux décisions prises.

Ainsi, les ressources hydriques en Algérie, limitées vulnérables et inégalement réparties subissent depuis plus de deux décennies les effets néfastes de la sécheresse et de la pollution.

Le problème s'aggrave dans les zones sahariennes où les besoins en eau augmentent surtout durant la période estivale.

En Algérie les zones arides représentent 95% du territoire national dont 80% dans le domaine hyperaride (**Halitim**, 1988 in **Berkal**, 2006). Ces chiffres à eux seuls montrent l'intérêt de ces régions sur le plan socio-économique (**Tahri**, 2008).

En effet, ces régions sont caractérisées par des déficits hydriques importants ($P < 100$ mm) Selon la mission FAO/Sida (octobre 1973-janvier 1974, **Mainguet**, 1995). En plus, un accroissement brutal des besoins, ces déficits hydriques doivent être maîtrisés.

Par ailleurs, le développement de la céréaliculture dans les zones sahariennes a été lancé au début des années quatre vingt. Son objectif est d'augmenter la production céréalière dont les niveaux de rendement en agriculture pluviale sont faibles dans le nord du pays (**Ziza**, 2006).

En général, on l'accepte bien que l'irrigation affecte les composants du rendement dans les conditions climatiques semi-arides (**Doorenbos** et **Kassam** 1979).

Dans ces zones sahariennes, le sol présente un faible niveau de fertilité, les réserves hydriques sont importantes, non renouvelables et diversement minéralisées, et les besoins en eau des cultures sont élevés à cause d'une forte demande climatique (**Daoud** et **Halitim**, 1994).

Laaboudi (2001) a montré que dans la région d'Adrar, la consommation globale d'une culture de blé est de l'ordre de **884** mm par cycle végétatif.

Dans une autre part, le bilan hydrique est établi pour un lieu est une période données, par comparaison entre les apports et les pertes en eau dans ce lieu et pour cette période.

La difficulté pratique de mesure de stock d'eau disponible dans le sol et des évapotranspirations, nous amène à utiliser des modèles de simulation pour une meilleure gestion de l'irrigation, pour cela un certain nombre de modèles de simulation de bilan hydrique ont été développés et ont fait l'objet d'étude pour des situations réelles comme par exemple le modèle STICS. Il est conçu par l'INRA (France) pour la simulation, en conditions agricoles, plusieurs variables dont, le bilan hydrique et ses composantes.

La plus part des modèles de simulation existants sont conçus dans des pays généralement à climat humide, et vues les différences hydroclimatiques entre ces pays et l'Algérie, surtout la zone saharienne, l'application de ces modèles constitue la première étape de validation de ces modèles (**Benkaci**, 2001). C'est ainsi que nous nous sommes fixés comme objectif principale d'évaluer la robustesse du modèle à réservoir.

Ce travail a été conduit dans le cadre d'une série de travaux initiés par l'institut national de la recherche agronomique d'Algérie (INRAA) station d'Adrar. Les objectifs sont:

- Suivre les variations du teneur en eau dans les différentes couches du sol durant la campagne.
- La détermination des différentes composantes du bilan hydrique par les mesures directes sur terrain, en plus, de l'utilisation des méthodes de simulation. Puis, une confrontation des résultats obtenus a été faite.
- Apprécier la méthode la plus fiable pour la gestion des irrigations dans la région (prélèvements tensiométriques, les cases lysimétriques ou bien, l'utilisation des modèles à réservoirs).

Dans notre cas, on n'a enregistré aucune étude qui contribue à la commodité de cet axe de recherche dans la région, ce qui rend la tâche plus ou moins difficile.

Ce travail est structuré en six parties :

- Le premier chapitre s'intéresse à la modélisation du bilan hydrique à la parcelle en plus, une description du modèle utilisé.
- Le second chapitre présente la région d'étude.
- Le troisième chapitre fera l'objet de la présentation des matériels et méthodes utilisés.
- Dans le quatrième chapitre on tentera d'interpréter et discuter les résultats obtenus.
- En fin, dans le cinquième et le dernier chapitre, on simule les différents paramètres du bilan hydrique.

*Chapitre I : La modélisation du bilan
hydrique*

Chapitre I : La modélisation du bilan hydrique :

Le bilan hydrique de la parcelle peut être appréhendé selon diverses approches guidées par les objectifs, les moyens expérimentaux pour estimer les paramètres et variables nécessaires au fonctionnement du modèle et la précision souhaitée sur son estimation (**Celette**, 2003).

L'approche de simulation-modélisation est une alternative appropriée pour prévoir la teneur en eau de sol dans la profondeur de zone de racine de récolte. En outre, ladite approche de plus en plus est employée comme alternative pour virer les résultats des essais en service réel sur des fermiers. (**Jones et Thorton**, 1993 in **Panigrahi et al** 2003), au niveau de champ, les modèles de bilan hydrique du sol peuvent commodément estimer la teneur en eau du sol.

Une partie fondamentale de comprendre et d'améliorer la gestion de l'eau est l'évaluation quantitative des composants principaux du bilan hydrique du champ. Le concept du bilan hydrique est l'une des plus grandes avancées en comprenant la réponse des cultures dans les conditions de limitations en eau. (**Khepar et al**, 2000).

I.1 Principe du Bilan Hydrique

Le principe du bilan hydrique est de considérer le sol comme un réservoir d'eau. Il consiste à estimer par le calcul, l'état de cette réserve en tenant compte de la quantité d'eau consommée par la culture et les apports des précipitations ou des irrigations. Lorsque la RFU (Réserve Facilement Utilisable) est consommée, la plante réduit son activité, sa croissance est plus lente, on parle de stress hydrique. Selon le stade de culture, ce stress hydrique peut avoir ou non des conséquences sur le rendement.

Le bilan hydrique d'une plante dépend donc de la quantité d'eau absorbée, essentiellement par les racines, de celle transpirée, surtout par les feuilles, et, enfin de celle stockée dans les réserves ou utilisée pour la croissance, mais les variations de la teneur en eau et les quantités d'eau utilisées pour la croissance sont négligeables en masse par rapport aux flux d'eau traversant les plantes (**Filali**, 2004).

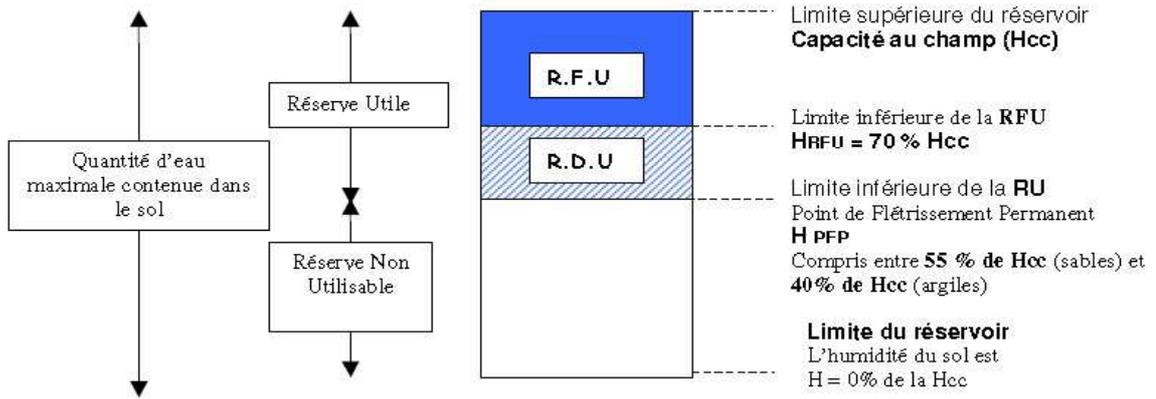


Figure 01 : le principe du bilan hydrique (Larrieu, 2008)

I.2 Equation du bilan hydrique :

L'équation traduisant le bilan hydrique sur une base journalière peut être écrite comme suit :

$$RH_j = RH_{(j-1)} + P(j) + I(j) - ETR(j) - R(j) - D(j) \dots\dots\dots(01)$$

Avec : RH_j : la réserve hydrique au jour j (mm)

$RH_{(j-1)}$: la réserve hydrique au jour j-1 (mm) bienveillance

$P(j)$: précipitations (mm)

I : irrigation (mm)

ETR_j : évapotranspiration réelle journalière (mm)

R_j : ruissellement

D_j : drainage (mm) ;

La réserve hydrique du réservoir sol provient essentiellement des précipitations (P) ou de l'irrigation (I). Cependant, elles ne sont pas toutes efficaces puisqu'une partie est perdue par ruissellement (R) et percolation profond : drainage (D) (Delli, 2003).

$$\text{Donc, } Pe = (P + I) - (R + D) \dots\dots\dots(02)$$

En pratique, on utilise généralement une équation simplifiée dans laquelle les termes d'écoulement latéral et de remonté capillaires ont été négligés :

$$RH = P + I + - ETR - D \dots\dots\dots(03)$$

Cette équation (11) est à la base de la plupart des modèles de bilan hydrique plus ou moins sophistiqués. Leur principe repose sur le concept de réservoir (Figure 01 et 02) dont la capacité est égale au produit d'un paramètre caractérisant le sol quant à ses potentialités hydriques, RU : réserve utile (mm/m), par la profondeur de sol mobilisée par les racines.

Le calcul du bilan hydrique consiste à décrire l'évolution du stock d'eau disponible dans le sol, c'est-à-dire sa quantité et sa répartition dans les différents horizons de sol (**Benhadj**, 2008).

I.3 Gestion du bilan hydrique :

Le développement des techniques de mesure des teneurs en eau et de charge hydraulique totale *in situ* ont permis d'introduire parallèlement à la gestion « agro-climatique », une gestion « pédoclimatique » du bilan hydrique.

Dans la gestion « agro-climatique », le terme ΔS est estimé à partir des mesures de pluie ou d'irrigation et des calculs d'évapotranspiration. Il en est de même du terme « drainage » considéré comme le volume non stockable dans le sol quand le volume apporté par la pluie ou l'irrigation dépasse les capacités de stockage du sol.

Dans la gestion « pédoclimatique », le terme ΔS est mesuré et l'existence ou l'absence du « drainage » peut être mise en évidence.

I.4 Détermination de différents paramètres de bilan hydrique :

La mesure des différents composants du bilan hydrique dans la zone racinaire dans les grands projets d'irrigation sur la base quotidienne est encombrante et souvent prohibitif en raison du temps et de la dépense excessive impliquée dans l'exécution (**Khepar et al**, 2000).. L'utilisation des instruments sophistiqués comme la technique de TDR pour la mesure du paramètre pédologiques peut être commode mais chère pour le point de vue agriculteur. Par conséquent, L'estimation de ces différentes composantes du bilan hydrique permet d'accéder à l'efficacité du système d'irrigation. Cette efficacité dépend à l'évidence de la pratique de l'agriculteur notamment des doses qu'il utilise et de la fréquence d'application de ces doses. Elle dépend aussi du contexte pédoclimatique, du type de culture et du système d'apport d'eau. Ces facteurs ont un impact plus ou moins accentué sur la stratégie (fréquence-doses) de l'irrigant soucieux d'économiser l'eau (**Mailhol**, 2003).

Dans les systèmes d'irrigation existants l'évaluation appropriée de différents composants du bilan hydrique dans le champ (par exemple évapotranspiration, infiltration, percolation et

ruissellement) peut aider à réaliser une utilisation efficace de l'eau disponible et à optimiser des surfaces de terre cultivées avec des quantités limitées de l'eau d'irrigation (**Khepar et al, 2000**).

Parmi les divers composants du bilan hydrique, l'évapotranspiration a probablement été le composant le plus difficile à quantifier et à mesurer expérimentalement (**Cui et Zornberg, 2008**).

Il existe plusieurs méthodes pour le calcul de l'évapotranspiration on peut cite : les approches expérimentales telles que la méthode du bilan hydrique (**Damagnez 1968; Katerji et Hallaire 1984**), la méthode lysimétrique (**Ducrocq 1987; Marek et al. 1988**) et les méthodes microclimatiques basées sur le bilan d'énergie de la surface du couvert végétal (rapport de Bowen, méthode des corrélations turbulentes ou méthodes aérodynamique, méthode d'écoulement de sève, modèle de **Penman-Monteith**, approche de coefficient culturelle et la méthode de la modélisation de bilan hydrique) (**Rana et Katerji, 2000**).

I.5 La modélisation du bilan hydrique

I.5.1 Généralités

Il y a environ quatre décennies, que La simulation des différents paramètres du bilan hydrique a commencé ; maintenant c'est une technologie avancée avec des nombreux modèles en service pour la conception des systèmes pour l'approvisionnement en eau agricole et urbaine. La simulation du bilan hydrique, selon (**Albergel et al, 1991**), est une démarche simplificatrice, dont le but est de permettre d'aborder le plus aisément possible le devenir de l'eau au champ. C'est le bilan hydrique qui peut provenir de vraies mesures d'utilisation d'eau (**Droogers et al, 2000**).

Parmi les modèles de bilan hydrique, il y a les modèles très simples, qui emploient un réservoir pour représenter l'humidité du sol et le stockage d'eaux souterraines, et les modèles très complexes, avec plus de 25 paramètres (**Boughton, 2005**).

Compte tenu des limites des systèmes de mesure directe de l'alimentation hydrique, on a le plus souvent recours à la modélisation pour estimer le bilan hydrique, en tenant compte du continuum sol – plante – atmosphère. Cependant, cette méthode reste la seule qui permet une modélisation simple à l'échelle de la parcelle de l'évolution hydrique du sol et des plantes au cours du temps (**Tardieu et al, 1991 in Leulmi, 2007**).

I.5.2 Définitions d'un modèle:

De nombreuses définitions existent dans la littérature et il apparait difficile d'en retenir une plutôt qu'une autre. Néanmoins, celle proposé par **Odum (1975) in Gate (1995)** convient parfaitement aux différents modèles qui seront présentés « un modèle est une formulation simplifiée qui limité les phénomènes du monde réel de telle sorte qu'il nous permet de comprendre des situations complexes et de faire des prévisions. Dans leur forme la plus simple, les modèles peuvent être verbaux ou graphiques. C'est-à-dire être faits dénoncés concis ou de représentations picturales.

Autrement dit, un simple graphique de type XY ou une régression linéaire entre deux variables (par exemple) constituent déjà des modèles ; ceci dépend du niveau de complexité du phénomène que l'on analyse (**Gate 1995**).

En plus, (**Vernat, 2004**) mentionne qu'un modèle est une représentation idéalisée – une description abstraite et simplifiée – d'une situation du monde réel à étudier ou à analyser.

Leffelaar et **Ferrari** (1989) in **Mancer** (2005) indiquent qu'un modèle est une représentation simplifiée d'un processus ; ce n'est donc qu'une interprétation de la réalité, et sa validité dépend surtout des hypothèses faites pour analyser tel phénomène. Ces hypothèses mettent en relations divers éléments dépendant les uns des autres.

I.5.3 Pas du temps :

La spécificité du pas de temps, bien que souvent négligée, est importante, une même structure de modèle n'étant pas également performante à tous les pas du temps. Globalement, les structures sont d'autant plus simples que le pas de temps est long (**Perrin et al**, 2007).

I.6 But de la modélisation du bilan hydrique :

Quel que soit le degré de complexité d'un modèle de bilan hydrique du sol, un tel modèle doit remplir deux fonctions distinctes :

- Une fonction de *gestion* de l'évolution de la réserve en eau du sol au cours du temps ;
- Une fonction de *régulation* de l'évapotranspiration réelle (ETR) par rapport à son niveau maximal ETM (**Tuzet et Perrier**, 1998).

Le but est de gérer la réserve en eau dans la zone racinaire du sol en fonction de la pluie (apport) et de l'évapotranspiration des cultures (demande).

La modélisation de bilan hydrique permet premièrement, une gestion de la réserve en eau du sol au cours du temps, et deuxièmement, une régulation de l'ETR par rapport à son niveau maximal (**Delli**, 2003).

I.7 Bilan hydrique simulé selon le concept RU :

Dans certains modèles, le sol par simplification est assimilé à un réservoir (ou une succession de réservoirs), la capacité du réservoir en eau du sol, appelée réserve utile (**RU**) est définie par rapport à la capacité au champ et au point de flétrissement (voir chap.1).

I.7.1 Réservoir sol

Le réservoir 'sol' se présente comme un système à une entrée et une sortie. L'entrée se résume à une fraction de la pluie P et/ou de l'irrigation I , et la sortie à une fraction de l'évapotranspiration E et de drainage D . Ces deux fractions sont conditionnées par le rapport entre le stock du réservoir (S) et sa capacité maximale (A) figure 02.

Si le réservoir de stockage est rempli au maximum et la précipitation excède l'évapotranspiration potentielle, l'excès de précipitation produit un débit. D'autre part, si le réservoir est vide et l'évapotranspiration potentielle excède la précipitation, la demande de l'évapotranspiration est non satisfaite. Enfin, si le stock du réservoir est dans un état intermédiaire et l'évapotranspiration potentielle est non satisfaite, il n'y a pas de production de drainage (Milly, 1993).

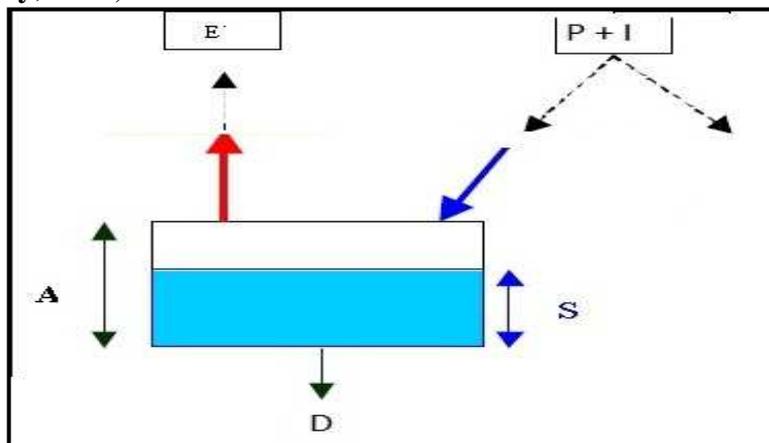


Figure 02: Fonctionnement d'un réservoir sol *in* (Mouelhi, 2003)

Le sol peut être considéré comme un réservoir unique (Forest, 1984 ; Lhomme et Eldin, 1985) un réservoir double (Reddy, 1983 ; Choisnel, 1985) ou une série de plusieurs réservoirs (Baier et Robertson, 1986 in Chourghal, 2003), mais, Mailhol, 2005 divise le sol en 3 réservoirs.

I.7.2 Limites du bilan hydrique simulé

Madi (2009) a montré que le bilan simulé est très sensible à l'estimation de la réserve initiale du sol. D'autre part, RU est difficile à estimer car la notion de point de flétrissement permanent surestime l'eau disponible pour la plante, étant donné qu'elle ne tient pas compte de la densité racinaire ni de la capacité de transpiration de la plante. Certains modèles fondés sur ce concept (modèles dites capacitifs) utilisent des fonctions de simulation du profil racinaire pour pallier à cette difficulté.

Des améliorations sont obtenues en effectuant des contrôles au cours de la campagne, pour recalculer certaines grandeurs utilisées pour le calcul comme la réserve en eau initiale et l'enracinement, constitue une source d'amélioration du bilan hydrique simulé. La détermination des flux (et des bilans de consommation sous culture) d'eau et d'azote en fonction de l'occupation des sols et des divers traitements passe par l'établissement d'un bilan hydrique, définissant notamment les pertes par drainage ou par évaporation/évapotranspiration. La précision du bilan dépend de la précision avec laquelle est obtenue l'évapotranspiration ou surtout le drainage.

I.8 Différentes modèles de bilan hydrique : Deux grands principes s'opposent :

I.8.1 les modèles simples à réservoirs :

Ces modèles divisent le sol en une ou plusieurs couches superposées. Chacune d'entre elles est qualifiée par son humidité et une humidité minimale (généralement au point de flétrissement permanent). Les consommations en eau (transpiration et évaporation) sont calculées à partir des grandeurs climatiques mesurées, de l'état hydrique du sol et de caractéristiques de la plante . Les transferts d'eau dans le sol sont fortement simplifiés et, bien souvent, les remontées capillaires et d'autres phénomènes de redistribution sont négligés (**Celette**, 2003).

Quand le réservoir est plein, on assume que l'eau supplémentaire devient drainage profond. Les seules données d'entrée exigées par ce modèle sont : la précipitation, l'évapotranspiration réelle estimée à partir de l'évapotranspiration potentielle et la teneur en eau du sol, et la capacité de stockage disponible de l'eau.

Dans cette catégorie on peut distinguer les modèles où le sol est un horizon unique, cas le plus fréquent, et ceux où le sol est constitué d'une succession d'horizons ; le modèle fonctionne sur le même principe en tenant compte des caractéristiques hydrodynamiques de chaque horizon.

I.8.2 Modèles mécanistes complexes :

Ces modèles sont basées sur les équations descriptives du mouvement de l'eau dans le sol (**Zeller**, 1983 in **Chourghal**, 2003). Ils utilisent une approche issue de la physique du sol où les transferts d'eau sont calculés par l'équation de Richards, dérivée de la loi de Darcy et de celle de conservation de la masse (**Celette**, 2003). Etant basés sur des concepts purement physique, ces modèles permettent tout mouvement d'eau dans le sol, y compris les remontées

capillaires. Dans ces modèles les flux d'eau dans le sol reposent sur des lois physiques ou biologiques.

I.8.3 Intérêt et limites de deux types des modèles

Le tableau suivant présente une comparaison entre les deux types des modèles à réservoirs

Tableau 01 : les intérêts et les limites des modèles à réservoirs

	Modèles simple	Modèles mécanistes
Intérêt	Peu exigeant en variables Facilité de mise en œuvre	Domaine de validité plus Etendu
Limites	RU, paramètre mal défini Non applicable si remontée Capillaire est élevé	Exigeant en variables Complexité de mise en Œuvre

(D'après **Leenhardt** 1991 in **Pindard**, 2000)

I.9 Les modèles à réservoirs (conceptuels):

Le système sol-plant-atmosphère apparait complexe, dans lequel les précipitations se répartissent entre plusieurs niveaux de stockage temporaire en interaction (végétation, surface du sol, nappe, ...) avant de retourner dans l'atmosphère (par évaporation) ou d'être évacuées hors des limites du sol occupé par les racines (**Benkaci**, 2001).

Les modèles a réservoirs ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter les problèmes de surparamétrisation et leur confère une bonne robustesse (**Perrin** et al., 2007).

I.9.1 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement de base est que les différentes parties du sol se comportent comme des réservoir d'eau se remplissant chacun suivant une loi conditionnée par la partie supérieur (atmosphère) et se vidant suivant une loi qui dépend de sa propre constitution, de son degré de remplissage et parfois de l'état des réserves situées en profondeur (**Benkaci**, 2001).

I.9.2 Application des modèles à réservoirs: (Perrin et al., 2007).

Ces modèles peuvent être utilisés pour un certain nombre d'application d'ingénierie ou de gestion de l'eau, on peut citer :

a- **la reconstitution ou l'extension de séries de débit** : après calage, le modèle est appliqué en simulation sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées ;

b- **la prédétermination** : la série climatique observée étant souvent courte, il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle à réservoirs.

c- **la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages** : grâce au modèle à réservoirs ; on peut, dans une étude de dimensionnement, simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien d'étiage, écrêtement de crue, etc.) en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports. En conditions opérationnelles, la prévision des apports peut permettre en mieux gérer l'ouvrage (**Yang et al., 1991**).

I.9.3 Choix du modèle à utiliser

Le choix du modèle à utiliser s'effectue en tenant compte de la disponibilité des données nécessaires à son fonctionnement et des moyens à disposition (moyens Informatiques notamment) pour l'application du modèle.

Pour notre essai, nous avons choisis le modèle STICS qui a prouvé sa performance sur la culture de blé dur en plusieurs régions. Plus de 61 publications dans des revues internationales avec comité de lecture et plus de 158 communications dans congrès ou symposiums.

I.10 Présentation du STICS

I.10.1 Généralité :

STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standards) (**Brisson et al., 1998, Brisson et al., 2002, Brisson et al., 2003**) est un modèle de culture conçu par l'INRA, en collaboration avec des instituts techniques (AGPM, ITCF), comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. C'est une plate-forme modulaire (Figure 04) de modélisation paramétrée pour une douzaine de cultures, sa robustesse a été démontrée pour les espèces les plus étudiées (blé, maïs) (**Brisson et al., 2002 ; Rudget et al. ; 2002**) et il donc utilisable dans des conditions pédoclimatiques très diverses. STICS intègre à son bilan hydrique certaines approches plus élaborées que celles d'un modèle à réservoirs simple, qui

permet d'évaluer la demande transpirative ou l'évaporation réelle à partir d'une analogie électrique (Celette, 2003). Le sol est décrit selon une superposition de couches et les absorptions des ressources du sol sont déterminées en fonction des densités racinaires. Il capitalise un ensemble de connaissances en physiologie, agronomie, et bioclimatologie.

Nous avons utilisé la version 6.2

STICS simule le bilan de carbone, le *bilan hydrique* et le bilan d'azote du système et permet de calculer à la fois des variables agricoles (rendement, consommations d'intrants) et des variables environnementales (pertes d'eau et de nitrate) dans diverses situations agricoles.

La mise en œuvre du modèle requiert quatre sources de données (Figure 03) :

- **Données climatiques** : température minimale, maximale, pluviométrie, évapotranspiration potentielle (ETP), du rayonnement global, humidité relative et vitesse du vent au pas de temps journalier
- **Données « sol »** : le sol est décrit comme une succession de couches horizontales caractérisées par des propriétés physiques (épaisseurs, masse volumique, teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, teneur en cailloux). La couche de surface, où se concentre l'activité biologique) est caractérisée plus précisément par des paramètres physico-chimiques (teneurs en argile, en calcaire, en azote organique, albédo etc.) ;
- **Paramètres « culture »** : il s'agit des paramètres relatifs aux différents processus simulés (germination, levée, développement etc.) incluant la prise en compte de l'effet des stress hydrique, thermique et azoté sur le fonctionnement de la plante ;
- **données « techniques culturales »** : elles déterminent les modalités et les dates des interventions culturales (semis, irrigation, apports d'engrais azotés, apports d'amendements organiques, récolte, travail du sol, incorporation des résidus de culture etc.).

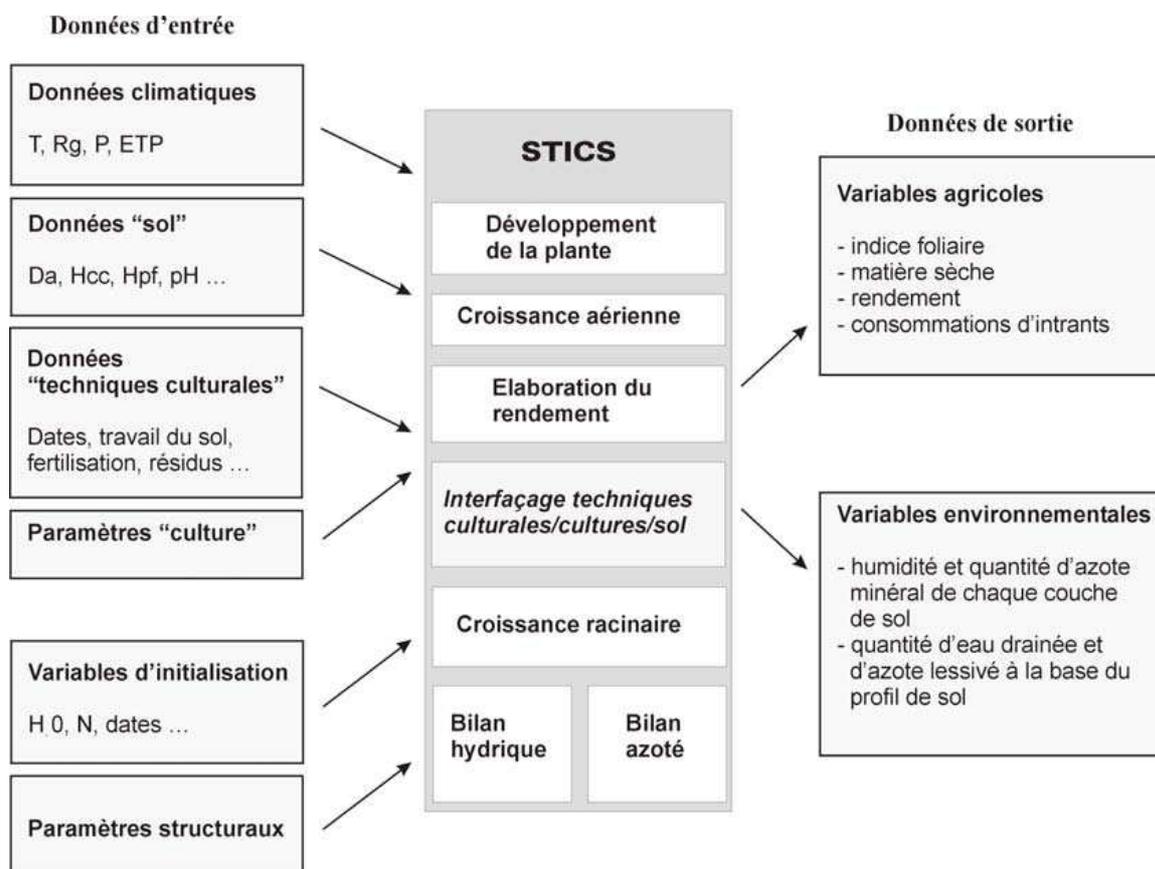


Figure 03 : Organisation générale du modèle agronomique STICS. (d'après Notice utilisation STICS, INRA, France, 2002)

I.10.2 Organisation en modules et optionalité :

Les différents modules de STICS :

Le modèle STICS est organisé en modules (Figure 03), chaque module faisant appel à un certain nombre de sous-programmes (ou sous-modules) traitant de mécanismes spécifiques :

- *Un premier ensemble de trois modules traite de l'écophysiologie des parties aériennes des plantes (développement, croissance aérienne, élaboration du rendement) (Documentation STICS).*
- *Un second ensemble de quatre modules traite du fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines des plantes (croissance racinaire, bilan hydrique, bilan azoté, transferts)*
- *A l'interface se trouve un module de gestion des interactions entre les techniques culturales et le système sol-culture, qu'il s'agisse des apports d'eau, d'engrais ou du microclimat.*

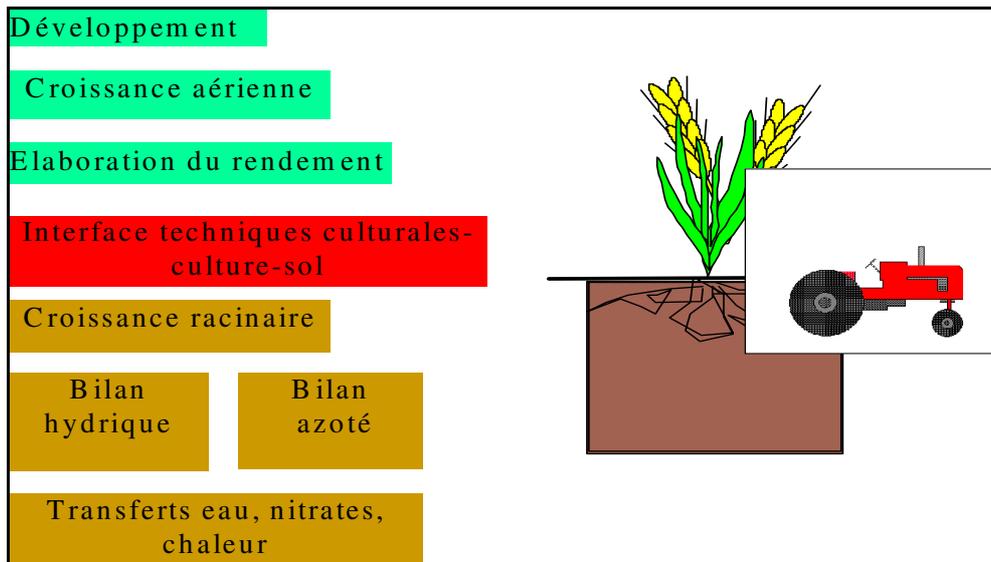


Figure 04 : Structure modulaire de STICS. Chaque module fait appel à des sous programmes traitent des mécanismes spécifiques (d'après Notice utilisation STICS, INRA, France, 2002)

Il existe également des options de choix de formalismes qui ont deux objectifs :

- Permettre de tester des choix de formalismes à l'intérieur du modèle (ex : option densité racinaire vraie/profil type, effet température sur le remplissage,...). Dans ce cas, elles ont un caractère provisoire dans l'attente des prochaines réunions.
- Permettre d'étendre l'adaptation du modèle à des systèmes de culture variés (ex: option culture déterminée/indéterminée, option macroporosité sol, option culture fauchée,...).

Nous nous contenterons dans ce qui suit de décrire le module du bilan hydrique au sein du STICS.

I.10.3 Bilan hydrique

Le calcul du bilan hydrique dans STICS est relativement complet. Il est décomposé en évaporation du sol (potentielle et réelle) puis sa répartition dans le profil du sol, et en besoins en eau de la culture.

Le bilan hydrique est simulé par une analogie réservoir par couche de 1 cm d'épaisseur à partir des données hydrologiques du sol (RU, Hcc, Hpfp, Da) (Figure 05). Il prend en compte l'évaporation du sol, l'absorption racinaire (à l'échelle de la journée elle équivaut à la transpiration foliaire) et l'infiltration d'une couche à une autre.

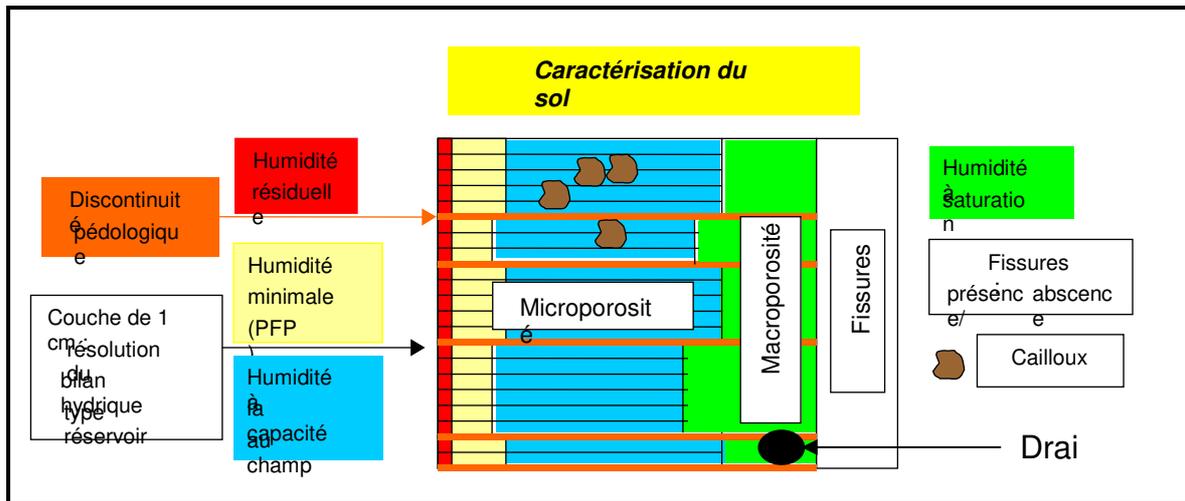


Figure 05: schéma du système drainant considéré (d'après Notice utilisation STICS, INRA, France, 2002)

Comme le montre le schéma (Fig. 10) ci-dessus, la description du sol peut comporter jusqu'à 4 compartiments : la microporosité, la macroporosité, les fissures (cas des sols argileux gonflants) et les cailloux. Cependant seule la description de la microporosité est obligatoire, la description des autres compartiments est facultative.

Le modèle simule les besoins en eau des cultures par un coefficient cultural maximal pour un indice foliaire de l'ordre de 5, qui permet de connaître la transpiration maximale de la culture (équivalent à l'ETM) compte tenu de l'énergie disponible au niveau des plantes et l'état de l'atmosphère dans la végétation. Quand il y a apport d'eau (pluie ou irrigation) STICS calcule les quantités d'eau arrivant au sol, après interception d'une partie de l'eau par le feuillage.

L'eau qui persiste sur le feuillage (déduction faite de l'écoulement) est soumise à la demande évaporative de l'atmosphère et s'évapore dans le modèle comme une nappe d'eau libre.

A la surface du sol l'eau apportée résulte de la pluie et de l'irrigation affectée d'un paramètre d'efficacité (prise en compte des pertes d'eau à l'irrigation).

Quand l'offre en eau est inférieure à la demande, le rapport permet de calculer des indices de stress qui jouent sur la croissance de la plante :

- indice de stress de turgescence : il représente la diminution de pression hydrique des cellules qui limitent la croissance foliaire.
- indice de stress stomatique (transpiration réelle / transpiration maximale) : il simule la fermeture des stomates et donc ralentit l'accumulation de la matière sèche.

I.10.4 Intérêts et limites

a- Intérêts

STICS est présenté comme un modèle ayant des qualités de robustesse, facilité d'accès aux données d'entrée, souplesse d'évolution et de facilité d'adaptation à différentes plantes.

Originalité par rapport aux autres modèles :

- Utilisation de données d'entrée facilement disponibles (peu gourmand en données d'entrée) ;
- Travail en condition agricole (plus facilement opérationnel) ;
- **Généricité** : adaptable pour différentes cultures même s'il a été conçu au départ pour le blé et le maïs. STICS a déjà été utilisé pour les tomates, bananiers, soja, ... sans modification de sa structure.

b- Limites

Absence de prise en compte de certains phénomènes :

- volatilisation de l'ammoniac
- effet possible de l'alimentation azotée sur le début de la sénescence du couvert végétal.
- résistance à la sécheresse
- sol asphyxiant
- combinaison stress hydrique – stress azoté
- prise en compte des pathologies.

I.10.5 Les fichiers de sorties : STICS permet d'obtenir différents types de fichiers de sorties

- ✓ Un fichier bilan de simulation qui donne les informations de base : les données d'entrées, les phases de développement de la culture, la croissance et les composantes du rendement, bilan au et azote sur le cycle et sur toute la période de simulation.
- ✓ Le fichier rapport qui donne une synthèse de toutes les simulations réalisées sous la forme d'une ligne par simulation.
- ✓ Deux fichiers dynamiques qui permettent d'examiner dans le détail chronologique l'évolution des variables : l'un concerne les variables que l'on peut comparer à des données observées (ce n'est pas notre cas) et l'autre plus ouvert donne à l'utilisateur, le choix de 20 variables dans une liste qui en comprend 165.
- ✓ Le fichier profil permet de récupérer l'une des variables sol (humidité, température, azote, densité racinaire) par cm du sol, à des dates choisies.

✓ Le fichier historique qui informe sur la valeur des paramètres actifs de la simulation et les problèmes rencontrés lors de l'exécution. (**Brisson *et al.*, 1998**).

I.11 Evaluation de la robustesse d'un modèle :

Plusieurs études ont été consacrées pour l'évaluation des modèles. Ces études ont prouvés que le calibrage des modèles est une issue complexe puisque les paramètres sont souvent interdépendants (**Duchemin, 2008**).

Outre, les problèmes théoriques et pratiques inhérents au développement des méthodes de modélisation, l'une des principales difficultés rencontrées est l'évaluation a priori de leurs performances.

Un modèle est une représentation mathématique qui résume les phases de transformation d'un phénomène. Une fois que le modèle est fondé, seule sa confrontation avec les données observées peut nous informer sur la robustesse du modèle ainsi que ses limites. Dans le cas de modèles à paramètres, ces mêmes observations doivent donc nous permettre d'identifier ces paramètres en s'ajustant aux données d'une part et nous informer sur sa performance d'autre part. Confronter le modèle à la 'réalité' c'est donc tout simplement le mettre en œuvre pour le caler et tester sa performance (**Mouelhi, 2003**)

L'évaluation peut s'envisager par plusieurs critères qu'ils peuvent être comparés :

- Mesures d'erreur dans la période d'évaluation : l'erreur carrée, l'erreur absolue, l'erreur absolue de pourcentage, erreur moyenne, erreur moyenne de pourcentage
- Mesures d'erreur dans la période de validation : idem le diagnostic résiduel et qualité à adapté des essais :
- Considérations qualitatives : l'aspect de la prévision trace, le caractère raisonnable intuitif du modèle, simplicité du modèle.

Addiscott et Whitmore (1987) in Post et al. (2004) ont déclaré que l'utilisation d'une seule méthode statistique pour mesurer l'anomalie entre les simulations modèles et les données mesurées peut être fallacieuse. Il est par conséquent nécessaire d'employer un ensemble de méthodes statistiques pour déterminer des forces et des faiblesses communes dans la simulation par des statistiques distinctes à décrire différents aspects de l'exactitude de la simulation.

I.12 Critères statistiques utilisés pour évaluer le modèle STICS

- Y_{ij} Valeur observée n° i de la variable j \hat{Y}_{ij} Valeur simulée n° i de la variable j
- n_j Nombre d'observations de la variable j \bar{Y}_j Valeur moyenne de la variable j
- n Nombre de variables ayant des observations

Pour chaque variable j , on calcule:

1. L'écart moyen $MD_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Y}_{ij} - Y_{ij}) \dots\dots\dots(04)$

2. L'écart relatif moyen $RMD_j = \frac{MD_j}{\bar{Y}_j} \dots\dots\dots(05)$

3. L'écart quadratique moyen $RMSE_j = \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Y}_{ij} - Y_{ij})^2} \dots\dots\dots(06)$

4. L'écart quadratique relatif moyen $RRMSE_j = \frac{RMSE_j}{\bar{Y}_j} \dots\dots\dots(07)$

5. L'écart pondéré moyen $MWE_j = \frac{1}{C_V} \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \left(\frac{\hat{Y}_{ij} - Y_{ij}}{Y_{ij}} \right)^2} \dots\dots\dots(08)$

Où C_V représente le coefficient de variation moyen sur les données*

6. La droite de régression et le coefficient de corrélation r^2 $\hat{Y}_j = aY_j + b \dots\dots\dots(09)$

* Ce calcul suppose que l'écart-type augmente proportionnellement avec la moyenne, ce qui est en général le cas pour les variables classiques: MS,N absorbé,N minéral du sol,...

7. L'efficience du modèle

$$EF_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Y}_{ij} - Y_{ij})^2}{\sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Y}_{ij} - \bar{Y}_j)^2} \dots\dots\dots (10)$$

Pour l'ensemble des variables **j**, on calcule:

1. L'écart relatif moyen

$$RMD = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n RMD_j \dots\dots\dots (11)$$

2. L'écart quadratique relatif moyen

$$RRMSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n RRMSE_j \dots\dots\dots(12)$$

3. L'écart pondéré moyen **

$$MWE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n MWE_j \dots\dots\dots (13)$$

4. L'efficience du modèle

$$EF = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n EF_j \dots\dots\dots(14)$$

** On suppose que toutes les variables ont le même coefficient de variation, par exemple $C_V = 0.15$ (l'idéal étant de paramétrer ce coefficient).

I. 13 Limitations :

Deux limitations principales sont fondamentalement précisées. Premièrement, il y a généralement un grand nombre de paramètres des modèles comparés à la quantité d'observation disponible pour leur identification. Ceci rend le procédé d'optimisation difficile à utiliser, puisque de bons ajustements peuvent être réalisés pour beaucoup de combinaisons des valeurs de paramètres. Ainsi, l'information (imparfaite) préalable sur des paramètres est exigée. Ceci a comme conséquence des erreurs de simulation et la réduction de la capacité prédictive de modèles (**Wallach et al**, 2002 in **Duchemin**, 2008). Deuxièmement, il est difficile de faire face au manque de données d'entrée proportionnées et suffisantes pour tourner le modèle à une balance régionale. Ceci concerne typiquement des données liées aux pratiques techniques telles que le calendrier de récolte aussi bien que les programmes d'irrigation et de fertilisation, qui connaissent le grand espace et chronométrent des variations (**Duchemin**, 2008)

Conclusion :

L'application de la méthode du bilan hydrique est limitée par la difficulté de quantifier les variables. Effectivement, les processus hydriques sont difficiles à observer directement sur le terrain et donc à mesurer. Notons que les erreurs de mesure éventuelles des termes qu'on retrouve dans l'équation simplifiée se répercutent directement sur les valeurs calculées de l'évaporation. Devant ces imprécisions, on suggère l'emploi de cette méthode dans le cas d'un avant-projet par exemple, pour vérifier l'état du système et surtout la validité (la fiabilité) des mesures qui le décrit.

De plus, le recours au calcul du bilan hydrique du sol permet de calculer l'ETR, puis d'estimer, à un pas de temps donné, la dose d'irrigation à apporter par le calcul de la différence (ETM-ETR). Ce calcul tenant explicitement compte d'une contribution du réservoir en eau superficiel du sol à l'évapotranspiration.

*Chapitre II : Présentation de la zone
d'étude*

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1 Situation géographique

La wilaya d'Adrar, située au Sud-ouest du pays à 1 543 Km d'Alger à une altitude de 258 m, et une latitude de 27°32 Nord et une longitude de 17°Ouest, elle est limitée :

- au Nord par la Wilaya d'El-Bayadh;
- à l'Ouest par la Wilaya de Bechar et Tindouf ;
- à l'Est par la wilaya de Tamanrasset et Ghardaïa;
- au Sud par le Mali, (figure 06).

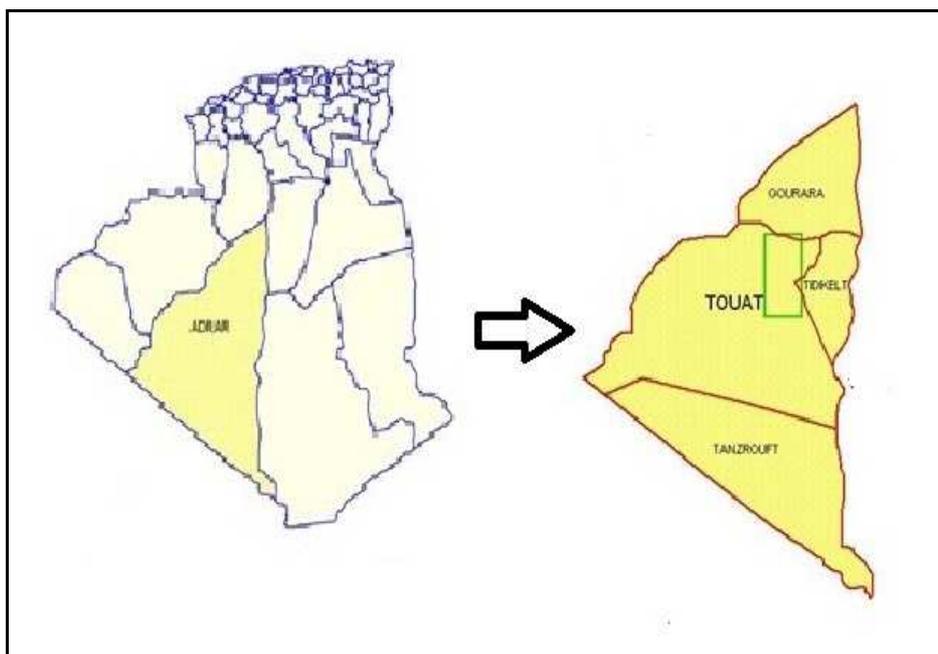


Figure 06 : Situation géographique de la wilaya d'Adrar (**Boutadara, 2009**)

II.2 Climatologie :

Le climat des régions sahariennes est un climat hyperaride caractérisé par la faiblesse des précipitations, des températures extrêmes élevées et des vents qui contribuent à augmenter la très forte évaporation.

Les précipitations dans les régions sahariennes sont très faibles et irrégulières, mais sont parfois très violentes. Les plus orageuses sont celles des saisons estivales (**Berkal, 2006**).

II.2.1 La température :

En été, les températures restent assez voisines à la moyenne des températures maximales (M) du mois le plus chaud varie avec la continentalité ; et restent supérieure à 40°C (**Benfekih, 2006**). Par contre, dans les mois les moins chauds de décembre à février, les températures moyennes entre 11 et 14°C (**Ziza, 2006**).

L'amplitude thermique journalière est importante toute l'année. Elle varie de 11 à 20°C, elle est nettement plus marquée pendant les mois les plus chauds (Figure 07).

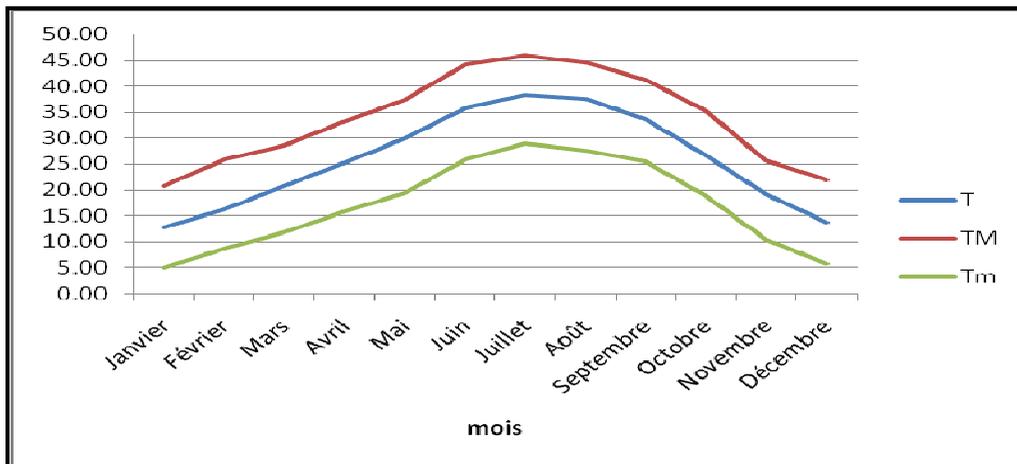


Figure 07 : Les moyennes mensuelles des températures moyennes (T), maximales (TM) et minimales (Tm) de 1980 à 2008.

II.2.2 La pluviométrie :

Elle constitue la quantité de pluie tombée dans un lieu donné. Elle conditionne l'apparition et l'existence d'une région désertique. En l'occurrence, ce sont les sécheresses qui gouvernent la biogéographie de la flore au Sahara (**Kherbouche**, 2007).

Tableau 02 : moyennes des précipitations période 1980-2008

mois	janv	fevr	mars	avril	mai	juin	juil	aout	sept	Octobre	nov	dec
P mm	2.29	1.34	4.47	8.43	19.52	4.08	4.04	0.33	0.42	3.30	1.49	0.67

Source : INRA Adrar, 2008

La pluviométrie est très faible pendant toute l'année. Elle ne dépasse pas 20 mm (tableau 02).

II.2.3 Le vent :

Le vent est la troisième composante du climat. C'est un facteur particulièrement actif et fréquent dans les régions arides désertiques, les vents les plus dominants dans la région d'Adrar est celle de Nord-Est et Nord-Ouest durant toute l'année (**Berkal**, 2006).

II.2.4 L'évaporation :

Toujours supérieur aux précipitations. L'évaporation est intense en été à cause des températures très élevées. La disproportion entre l'évaporation et l'alimentation en eau au Sahara, fait que l'air et les couches supérieures du sol sont presque toujours desséchés. Cet accroissement est moins important dans les palmeraies à cause de l'existence d'un microclimat sous l'effet oasis.

Tableau 03 : évaporation mensuelle enregistrée dans la région d'Adrar en 2008

mois	jan	fev	mar	avr	mai	jun	jul	aou	sep	oct	nov	dec
E (mm)	375.0	289.6	357.4	381.1	443.4	407.8	423.8	482.7	498.4	526.3	269.5	348.0

Source : INRA Adrar, 2008

L'évaporation reste forte pendant toute l'année dans la région d'Adrar. Elle se situe entre 270 mm et 526 mm. Le cumul annuel est de l'ordre de 4803 mm pour l'année 2008 (tableau 03).

II.2.5 Humidité relative :

L'humidité relative de l'air ou degré hygrométrique est le rapport entre la teneur réelle de l'air en vapeur d'eau et la teneur d'un air saturé à la même température (**Ozenda**, 1978 in **Kherbouche**, 2007). L'humidité relative est caractérisée par une moyenne annuelle inférieure à 50 %. Les valeurs minimales peuvent atteindre 20 % en mois de juillet et aout, et un maximum de 83% en janvier. (Tableau 04)

Tableau 04 : Moyenne mensuelle d'humidité relative en 2008

mois	jan	fev	mar	avr	mai	jun	jul	aou	sep	oct	Nov	dec	moyenne annuelle
HR % min	43.1	30.1	27.7	24.1	24.8	21.0	20.0	20.0	40.0	80.0	33.8	42.3	44.6
HR % Max	83.0	60.9	47.1	38.2	38.8	35.4	30.0	25.0	55.0	96.7	81.3	72.8	

Source : INRA Adrar, 2008

II.2.6 Insolation :

L'insolation atteint 3061 heures /an. La durée de l'insolation moyenne journalière est 8.76 heures par jour. Le maximum est atteint au mois de juin, par contre ; le minimum est constaté en février avec 192 heures (Tableau 05).

Tableau 05 : Insolation (heures) mensuelle d'Adrar pour l'année 2008

mois	jan	fev	mar	avr	mai	jun	jul	aou	sep	Oct	nov	dec	total
Insolation (h)	245	192	301.95	286.9	295.18	317.46	247.45	303.3	203.6	224.15	249.6	193.7	3061.29

Source : INRA Adrar, 2008

II.2.7 Synthèse climatique :

II.2.7.1 Climagramme d'Emberger et étage bioclimatique :

Le calcul du Quotient pluviométrique d'Emberger se fait comme suit :

$$Q2 = 3.43 P / (M - m) \dots\dots\dots(25)$$

P : précipitation annuelle total (mm)

M : température maximale du mois le plus chaud

m : température minimale du mois le plus froid

$$Q2 = 3.43 (6.09) / 47 - 3 = 0.47\dots\dots\dots(26)$$

La valeur du quotient pluviométrique est de 0.47, Selon le diagramme bioclimatique d'Emberger la région d'Adrar est classée dans l'étage climatique saharien à hiver tempéré.

En conclusion, la zone d'Adrar est une zone de désert absolu, son climat aride à sécheresse strict n'autorise aucune agriculture pluviale (Ziza, 2007).

II.2.7.2 Diagramme ombrothermique de Gaussen :

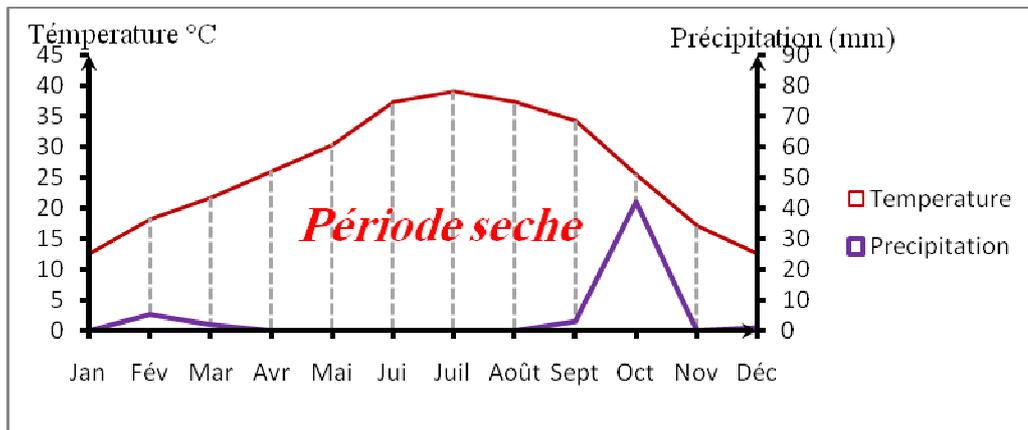


Figure 08 : Diagramme ombrothermique de Gaussen de la région d'Adrar 2008

D'après les diagrammes ombrothermique de l'année 2008 (figure 08), nous remarquons que la région d'Adrar se caractérise par une période sèche qui s'étale sur toute l'année.

II.3 L'agriculture dans la wilaya d'Adrar :

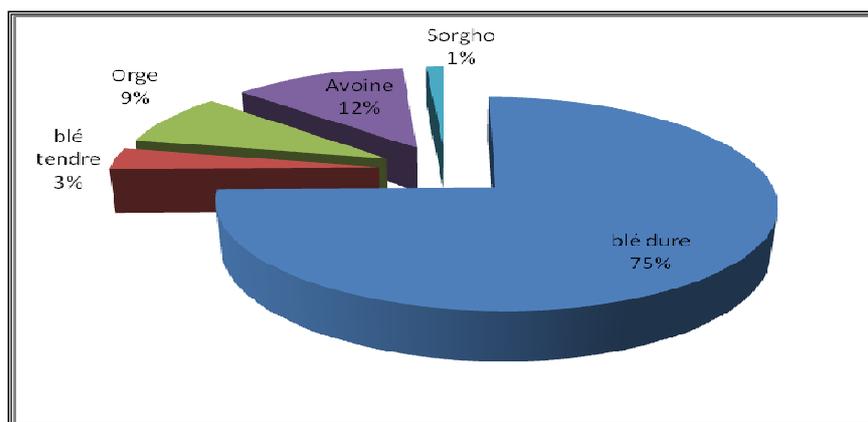
Selon les statistiques du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR) en 2006, la surface agricole totale (SAT) est de 337 650 ha, la surface agricole utilisée (SAU) couvre une superficie de 42598 ha.

Tableau 06 : répartition des surfaces irriguées dans la wilaya d'Adrar (Ha)

Céréales		Cultures Fruitières	Cultures Maraichères	Cultures Industriels	divers	Total
d'été	d'hiver					
66	6 575	28 862	4 200	365	1 753	47 2821

Source : MADR (2006)

II.3.1 La céréaliculture :



Source : DSA Adrar, (2008)

Figure 09 : Répartition des différents types des céréales en fonction des superficies cultivées

Le blé dur occupe le pourcentage le plus important pour couvrir les besoins de consommation qui augmente d'une année à l'autre (figure 09)

II.3.2 Rendements :

Les rendements moyens des céréales (blé dur et tendre) peuvent atteindre jusqu' 30q/ha (**tableau 05**), durant les premières campagnes de mise en culture le rendement peut atteindre jusqu'au 60q/ha puis on constate une chute progressive annuelle à cause de non respect des itinéraire technique recommandé dans les normes.

Tableau 07 : Rendement moyenne de différentes céréales

année	2000/2001	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007
blé dur (q/ha)	31,97	31,33	32,24	34,44	32,60	33,44	27,96
blé tendre (q/ha)	32,06	28,82	42,35	29,24	25,94	33,50	28,36
céréales (q/ha)	31,43	29,75	34,66	32,56	31,10	32,37	23,71

Source : DSA Adrar (2008)

II.3.3 Production en céréales :

La production des céréales est basée essentiellement sur les blés (surtout le blé dur) (tableau 08)

Tableau 08 : Production en céréales pour la campagne 2007/2008 (Q)

	Céréales d'hiver	Blé dur	Blé tendre	Orge	Avoine	Triticale
Prod. (qx)	40, 128,100	17, 728,000	9, 151,300	12, 358,800	890,000	0

Source : MADR, (2006)

II.3.4 Les surfaces :

On remarque que la superficie réservée aux céréales dans les systèmes de grande production est en diminution de 2742 Ha pour la campagne de 2003/2004 à 1006 Ha pour la campagne de 2006/2007 (tableau 09), cela peut s'expliquer par la migration des agriculteurs vers d'autres activités à cause des charges induites par l'utilisation de la mécanisation (pivot, forage), en plus le problème de commercialisation.

Tableau 09 : Surface réservée aux céréales pour quatre campagnes (2003-2007).

campagne	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007
Céréales sous pivot (ha)	2742	1196	1591	1006
céréales traditionnelles (ha)	4474	5461	5049	5223
total (ha)	7216	6657	6640	6229

Source : DSA Adrar (2008)

II.4 Les contraintes limitant la production de la céréale dans le sud Algérien

- La céréaliculture dans les régions arides fait face à des graves contraintes qui peuvent baisser leur rendement et leur qualité de production. Parmi ces principales contraintes on a :
- L'invasion des mauvaises herbes : elles présentent une menace sérieuse pour la culture de la céréale en zones sahariennes, qui causent des pertes importantes de rendement chaque année.
- La salinité des eaux et des sols constituent l'une des causes probables de la faiblesse des rendements en céréales observés actuellement dans les régions Sahariennes.
- L'absence de réseaux de drainage, pouvant provoquer la remontée de la nappe, et dans un second temps accentuer le problème de salinité.
- La non maîtrise de l'eau d'irrigation : en effet, son excès ou son manque de plus sa mauvaise maîtrise entraîne une concentration des sels totaux dans les couches arables des sols cultivés (**Mouhouche, 2000**).

Chapitre III : Matériel et méthodes

Chapitre III : Matériel et méthodes

III.1 Site expérimental

Notre expérimentation a été réalisée au niveau de la station expérimentale de l'Institut National de recherche agronomique (INRA Adrar) situé à 5 Km au sud du chef lieu de la wilaya, par des blocs orientée dans le sens Nord-Sud, dont les caractéristiques géographiques sont :

Latitude 27° 49' Nord,

Longitude 00° 11' Ouest,

Altitude 278 m,

Étage climatique saharienne à hiver tempéré.

III.2 Conditions expérimentales

III.2.1 Conditions climatiques

L'expérimentation a été réalisée durant la campagne (2007/2008) dans une parcelle déjà mise en culture (Tableau 11)

III.2.2 Conditions édaphiques

Le sol est sableux, son profondeur peut atteindre 1.5 m. Les analyses du sol de notre expérimentation ont donné les résultats reportés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Caractéristiques physico-chimiques du sol

Densité apparente	Capacité de rétention	PH	Conductivité électrique (mmhos/cm)	Conductivité hydraulique K (cm/h)
1.5	14.5	7.8	20.24	22

Source : Laaboudi, 2001

III.2.3 Qualité de l'eau d'irrigation :

Les eaux d'irrigation proviennent d'un forage profond de la nappe albiennne. Elle est légèrement salée, sa conductivité électrique est de 2mmhos/cm.

Tableau 11 : les paramètres climatiques du station expérimentale de l'INRA Adrar (2008)

Source : INRA Adrar, 2008

mois	température °C			HR %		E (mm)	vent (m/s)	Insolation (h/j)	Psychrométrie	
	TMin	Tmoy	TMax	m	M	Epiche			sec	mouillé
	janvier	5.94	13.12	20.29	43.1	83.0	123.55	168.28	7.93	7.29
février	10.26	17.65	25.03	30.1	60.9	136.52	171.90	6.63	12.02	6.96
mars	13.85	21.88	29.91	27.7	47.1	144.39	139.94	9.74	26.61	10.97
avril	17	25.38	34	24.1	38.2	183.80	181	10	22	11
mai	21.75	29.73	37.71	24.8	38.8	193.61	131.35	9.52	26.03	14.71
juin	25.83	34.76	43.68	21.0	35.4	220.30	139.24	10.58	29.42	16.13
juillet	30.85	38.56	46.27	20.0	30.0	228.92	134.15	8.53	33.83	19.09
août	29.00	36.86	44.72	20.0	25.0	236.29	147.10	9.78	41.17	17.93
septembre	25.39	34.14	42.89	40.0	55.0	136.86	116.29	8.14	27.75	18.77
octobre	17.79	25.36	32.94	80.0	96.7	124.83	149.58	8.30	22.43	20.82
novembre	10.61	17.48	24.34	33.8	81.3	105.23	137.32	8.32	12.91	9.37
décembre	5.76	12.52	19.28	42.3	72.8	70.78	115.86	8.07	8.44	5.18

TMin : température minimale

Tmoy : température moyenne

TMax : température maximale

HR % : Humidité relative de l'air

E : Evaporation

E bac : Evaporation enregistré au bac

III.3 Matériel végétal :

Le matériel végétal consacré à cette étude est une variété locale de blé dur sélectionné au niveau de l'INRA Adrar en 2006. Elle se développe bien dans les sols à texture sableuse. En plus, c'est une variété modérément tolérante à la salinité.

III.4 Gestion de l'essai

Dispositif expérimental :

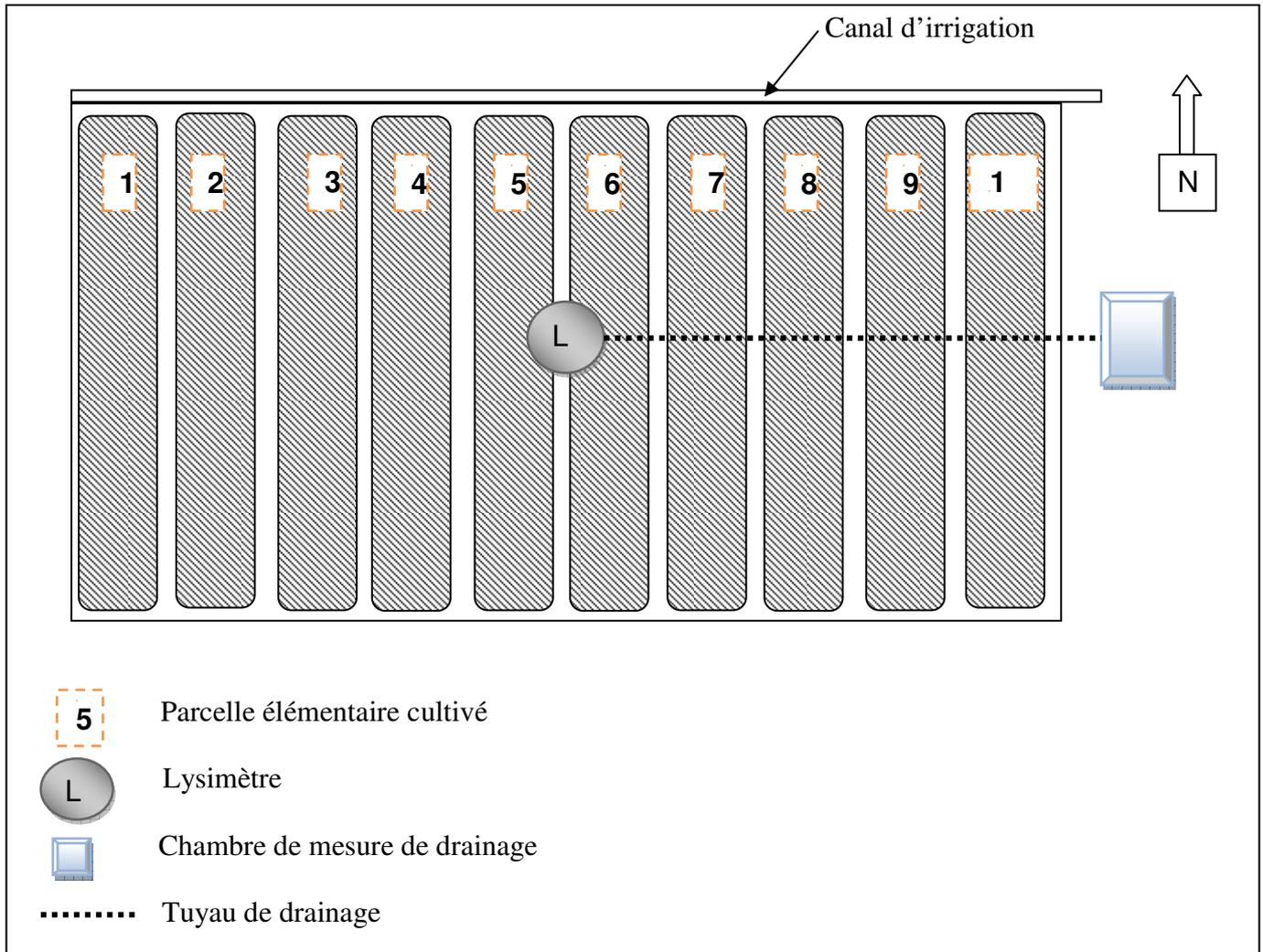


Figure 10 : dispositif expérimental

La parcelle est subdivisée en 10 parcelles élémentaires, pour faciliter l'irrigation (l'ensemble de ces parcelles forme l'anneau de garde). Le lysimètre est installé au milieu de la parcelle. Il est raccordé avec la chambre de mesure des drainages par une conduite.

La surface de lysimètre est de 3 m^2 .

La surface de l'anneau de garde est 500 m^2 .

Les tensiomètres sont installés à l'intérieur et à l'extérieur du lysimètre pour la mesure de la tension du sol à des profondeurs différentes.



Figure 11 : vue du site expérimental

III.5 Mise en place de la culture

Pour le but d'améliorer les caractéristiques physiques du sol, les travaux suivants ont été effectués avant la mise en place de la culture :

Une pré-irrigation, un labour profond, un épandage de fumure de fond et une confection des parcelles élémentaires.

III.5.1 Le semis

Le semis a été réalisé le 08 décembre 2007, avec une dose de 200 Kg/ha, à une profondeur de 3cm.

III.5.2 La fertilisation :

Un apport de triple phosphate à raison de 3 q/ha avant le semis,

Un engrais azoté sous forme d'urée au stade de tallage.

III.5.3 Irrigation :

L'irrigation se fait de telle sorte que la fréquence d'arrosage maintienne l'humidité du sol très proche de la capacité de rétention et pour éviter un excès d'eau qui sert à calculer le bilan hydrique.

Pour l'anneau de garde, l'irrigation est effectuée par le système gravitaire avec une fréquence de 2 fois par semaine.

Pour le lysimètre, l'irrigation a été effectuée manuellement à l'aide d'un arrosoir. Pour assurer une bonne uniformité des irrigations, nous avons apporté les quantités d'eau en les répartissant sur toute la surface du lysimètre. Les quantités d'eau apportées ainsi que percolées ont été mesurées. L'arrosage est fait quotidiennement, avec une dose qui augmente selon le stade végétatif. Le tableau 12 présente les doses moyennes selon les stades végétatifs.

Tableau 12 : les besoins moyennes en fonction des stades végétatifs

stade	Irrigation (mm/j)
semis	5,73
3f	5,73
tallage	5,73
montaison	5,73
épiaison	7,92
floraison	11,46
grain laiteux	12,21
grain pâteux	11,46
maturité	10,94

Les besoins les plus importantes sont apportées durant le stade de grain laiteux-pâteux.

III.6 Les paramètres étudiés :

III.6.1 Les paramètres climatiques :

Les relevés ont été effectués localement au niveau de la station météorologique de l'INRA Adrar, les facteurs mesurés sont

- Les températures maximales, minimales et moyennes ;
- La psychrométrie : thermomètres sèches et mouillés ;
- L'évaporation : (évaporomètre piche) ;
- Le vent : anémomètre à girouettes totaliseurs ;
- Les précipitations : pluviomètre.

III.6.2 Humidité du sol :

Pour mesurer l'humidité du sol, nous avons adopté la méthode gravimétrique, qui consiste à peser les échantillons du sol prélevés par tarière (à différentes profondeurs de 10 à 100 cm) avant et après séchage pendant 24 heures à 105 °C, le résultat de l'humidité pondérale (Hp) est déduit par la formule suivante :

$$H_p = \frac{P_H - P_S}{P_S} \times 100 \dots\dots\dots (27)$$

Avec: Hp : humidité pondérale en (%) ;

PH : humidité frais de l'échantillon (g) ;

PS : poids sec de l'échantillon (g).

a- Pour le suivi de stock du sol : Les prélèvements sont effectués en deux positions (intérieur et extérieur du lysimètre) sur cinq profondeurs 5, 20, 30, 50 et 80 cm à l'intérieur du lysimètre et à 20 et à 30 cm à l'extérieur du lysimètre.

Les prélèvements sont faits après une heure d'irrigation pour permettre à l'eau excédentaire de s'infiltrer. Le stock d'eau à différentes profondeurs est calculé par l'équation suivante :

$$S = \int_0^Z \theta_v \cdot dz \dots\dots\dots (28)$$

Avec ; S : stock de l'eau (mm)

Z : profondeur de l'horizon envisagé (mm)

θ_v : teneur en eau volumique.

b- Pour la détermination de la teneur en eau du sol :

Le prélèvement a été effectué sur quatre profondeurs chaque 15 cm jusqu'à 60 cm avec 5 répétitions et le résultat de la teneur en eau volumique que nous avons trouvé est de 57 mm/cm.

III.6.3 Mesure de la densité apparente :

Les échantillons prélevés au champ, sont transportés au laboratoire, ils sont mis dans une étuve à 105 C° pendant 24 heures. Après, on mesure la masse sèche de chaque échantillon M (g).

Le volume de l'échantillon est connu V (cm³). La densité apparente D_a , s'obtient par :

$$D_a = \frac{M}{\alpha \cdot V} \dots\dots\dots (29)$$

α : Masse volumique de l'eau.

Dans le présent travail, nous avons utilisé la méthode de cylindre.

III.6.4 Potentiel hydrique du sol :

Pour mesurer le potentiel matriciel ou la tension du sol, nous avons utilisé deux types de tensiomètres (avec manomètres ou avec capteur de pression). Les tensiomètres sont installés à l'intérieur et à l'extérieur du lysimètre (figure 12).

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.

III.6.4.1 Fréquence d'observation des tensiomètres :

Les lectures ont été faites quotidiennement et à la même période de la journée (avant-midi). Afin de s'assurer que le sol est suffisamment humide

III.6.4.2 Préparation du tensiomètre : (d'après Bergeron, 2005) :

- 1- Préparer la solution de remplissage (eau déminéralisée + colorant).
- 2- Remplir le tensiomètre et le réservoir du haut avec la solution de remplissage.
- 3- Veiller à ce que l'eau ait pénétré dans le tube du tensiomètre.
- 4- Immerger pendant au moins 24 heures la totalité du bout poreux du tensiomètre (bougie) dans un récipient contenant la solution de remplissage, le bouchon du tensiomètre étant dévissé.
- 5- Frapper légèrement le tensiomètre pour faire monter les bulles d'air.
- 6- Appliquer un vide avec la pompe aspirante, en maintenant la bougie poreuse dans l'eau. Vérifier les deux lectures des manomètres (pompe et tensiomètre) : elles doivent être semblables. Une différence marquée indique un mauvais fonctionnement possible de l'un ou l'autre des manomètres. Si tel est le cas, tester avec un autre tensiomètre. Visser le bouchon, puis coucher le tensiomètre sur le côté, le manomètre vers le bas, en frappant légèrement sur le manomètre afin d'enlever l'air qui aurait pu se loger dans le conduit qui mène à celui-ci.
- 7- Veiller à ce qu'il n'y ait pas de bulles d'air dans le tensiomètre.
- 8- Maintenir la bougie poreuse dans l'eau jusqu'à l'installation au champ.



Figure 12 : position des tensiomètres



Figure 13 : tensiomètre avec manomètre

Les profondeurs choisis sont :

A l'intérieur de lysimètre : 5, 20 et 30 cm pour les tensiomètres à manomètres

30, 50 et 80 cm pour les tensiomètres à capteurs

A l'extérieur de lysimètre : deux tensiomètres à manomètres à 20 et à 30 cm.

III.6.5 Mesure de drainage :

Le drainage est mesurée à l'aide de cases lysimétriques. Il existe une conduite qui relie le lysimètre et la chambre de mesure, où se fait le calcul de la quantité d'eau drainée.

III.6.5.2 Chambre de mesure :

La chambre est placée à l'extérieur de l'anneau de garde, sa superficie est de 9 m², sa profondeur est de 3 m. Elle est conçu de telle façon que les tuyaux de drainage puissent avoir une pente qui facilite l'écoulement de l'eau dans les bacs de récupération.

III.6.6 Mesures agronomiques :

- Détermination des stades phénologiques de semis jusqu'à la maturation.

Le tableau13 résume le résultat de suivi des stades phénologiques :

Tableau 13: suivi des stades phénologiques de la culture

JAS	date	stade
1	08 décembre 2007	semis
6	13 décembre	3feuilles
19	26 décembre	tallage
34	10 janvier 2008	montaison
68	13 février	épiaison
75	20 février	floraison
98	15 mars	grain laiteux
106	23 mars	grain pâteux
115	01 avril	maturité

- Indice de la surface foliaire « LAI » :

Le LAI est calculé manuellement, à partir de la mesure de la longueur (L en mm) et de la largeur (l en mm) de chacune des feuilles. LAI a été calculé par la formule suivante :

$$\text{LAI} = \frac{\text{surface foliaire (m}^2\text{)}}{\text{surface du sol (m}^2\text{)}} \text{ (m}^2\text{/m}^2\text{)} \dots\dots\dots (30)$$

- Caractéristiques de la production :

- nombre de pieds/m²
- nombre de grains/épi
- nombre totale d'épillets/épi
- poids de 1000 grains

III.6.7 Mesure de l'évapotranspiration maximale:

On dispose de méthodes de mesure directe. Pour cela, nous avons utilisé des cases lysimétrique.

Après la mesure de drainage (D), en connaissant la quantité apporté par irrigation (I), l'évapotranspiration maximale (ETM) peut être déduire par l'application de l'équation (13) du bilan hydrique présenté dans le chapitre 2.

$$\text{ETM} = \text{I} - \text{D} \dots\dots\dots (31)$$

On suppose que le ruissellement et la remonté capillaire sont négligeable, et le stock du sol reste stable durant l'essai parce que la culture est conduite au confort hydrique (pas de période de stress).

Chapitre V : Résultats et discussions

Chapitre IV : Résultats et discussions :

Cette partie est consacrée à l'analyse et l'interprétation des différents résultats obtenus, au cours de notre période d'essai. On donnera une caractérisation de l'état hydrique du sol, par des profils tensiométriques ainsi que l'évolution des stocks d'eau durant l'essai.

IV.1 Caractéristiques climatiques :

Les caractéristiques climatiques peuvent contribuer à une meilleure appréhension des résultats de notre essai.

La période d'essai caractérisée par l'absence de la pluviométrie ce qui sera comblé par les irrigations avec une fréquence très réduite durant tout le cycle cultural. Concernant les températures de l'air, nous avons enregistré des températures extrêmes avec des amplitudes énormes ($>45\text{ C}^\circ$) ce qui aggrave les conditions de déroulement de l'essai.

Donc, notre expérimentation va se caractériser par des conditions de sécheresse, ce qui nous a conduit à gérer les réserves disponible dans le sol.

IV.2 Le développement végétatif :

Les observations phénologiques du blé tout le long de son cycle végétatif permet de constater que la croissance était homogène et le comportement général de la culture était bon, à l'exception de présence de quelques adventices exterminé manuellement.

IV.3 Caractéristiques hydriques du sol

Les propriétés hydriques du sol peuvent être groupées en deux points:

Les propriétés agronomiques du stockage de l'eau dans le sol et qui comprennent :

- La capacité au champ,
- Le point de flétrissement permanent,
- La réserve utile.

Les propriétés physico-hydriques du sol.

- La courbe de rétention hydrique qui lié l'humidité d'un sol à la tension par laquelle elle est retenue.

IV.3.1 La capacité au champ notée Hcc :

La capacité au champ est la masse d'eau restant dans le sol ressuyé après un drainage rapide de un à deux jours (exprimée en % du poids du sol sec). Cette eau sera progressivement utilisée par la plante et évaporée par le sol (**Lafon** et al, 1988).

La quantité totale d'eau susceptible d'être mise à la disposition des plantes, sur la profondeur de 0 à 80cm du sol, est de **192** mm.

IV.3.2 Le point de flétrissement permanent noté Hpf:

Il correspond à l'humidité qui n'est plus extractible par les plantes, excepté, les halophytes et certaines espèces ligneuses xérophytes. Lorsque cette limite est atteinte, le végétal fane rapidement. Elle caractérise chaque type de sol. La succion à exercer pour déterminer cette humidité est de 16 bars, soit pF 4,2 à l'aide d'une presse à membrane

La quantité d'eau qui reste dans le sol, sur la profondeur de 80cm, est de **64** mm au point de flétrissement permanent.

IV.3.3 La réserve utile notée RU:

C'est la quantité d'eau stockée dans le sol et qui est disponible pour les plantes, entre la capacité au champ et le point de flétrissement. Cela implique donc la connaissance de ces limites.

Nous avons déterminé la valeur de la réserve utile pour un horizon de 80cm du profil, le résultat a donné la valeur de **128** mm de lame d'eau

Nous venons donc de définir les termes qui limitent la disponibilité de l'eau pour les plantes. Ils aboutissent à la connaissance des réserves utilisables du sol, qu'il est intéressant de calculer en mm d'eau par cm de sol susceptible d'être exploitée par les racines d'une culture, ainsi la détermination de l'eau utile sur les premiers 100cm de sol, ou on suppose se localiser la quasi-totalité des racines (des céréales) est égale à 1,02mm d'eau par cm de sol. En général, il est admis que la moitié (ou les deux tiers) de la RU est facilement utilisable (RFU) (**Brochet** et **Gerbier**, 1975). A partir de cette limite (RFU), la plante fait intervenir son mécanisme de défense contre la sécheresse (régulation stomatique).

IV.3.4 La courbe de rétention :

La figure 14 représente la synthèse des quatre courbes, de celle-ci on retient que:

- aux faibles valeurs de l'humidité, la profondeur de 30 à 40cm possède toujours la faible valeur de tension par rapport aux autres profondeurs ce qui est montré par **Madi** en 2009.

- aux fortes valeurs de l'humidité, la profondeur de 50 à 60cm possède toujours la forte valeur de tension par rapport aux autres profondeurs.

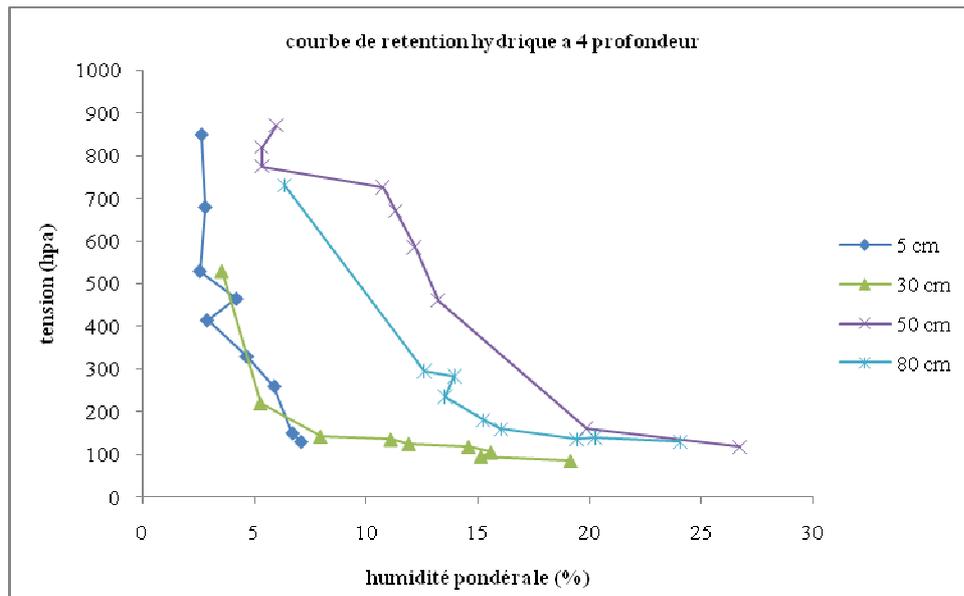


Figure 14 : courbe de rétention hydrique ajustée des cinq profondeurs (5, 30, 50 et 80cm).

IV.4 Analyse de la cinétique hydrique du sol :

Le sol joue un rôle de réservoir dans l'alimentation en eau des plantes. Il est donc nécessaire de connaître différents paramètres indicateurs de son état hydrique et les relations qui le retiennent.

Le suivi de la cinétique hydrique du sol permettra de rendre compte de la contribution de l'eau du sol dans l'alimentation de la culture.

Au champ, deux mesures permettent d'estimer la disponibilité de l'eau du sol : la teneur en eau et le potentiel hydrique du sol.

IV.4.1 Profil hydrique :

Hénin (1977) a proposé pour l'étude du profil hydrique le suivi de la réserve en eau a travers les différentes périodes de végétation :

- du semis à la reprise ;
- la reprise ou début de floraison ;
- la floraison ;
- la fin de floraison à la maturation.

a. du semis à la reprise : (figure 15)

Durant cette période l'humidité diminue en fur à mesure avec la profondeur à cause de la concentration des humidités dans l'horizon de 50 à 60 cm, le profil montre une réhumectation au niveau des horizons profonds suite aux apports d'eau par irrigation.

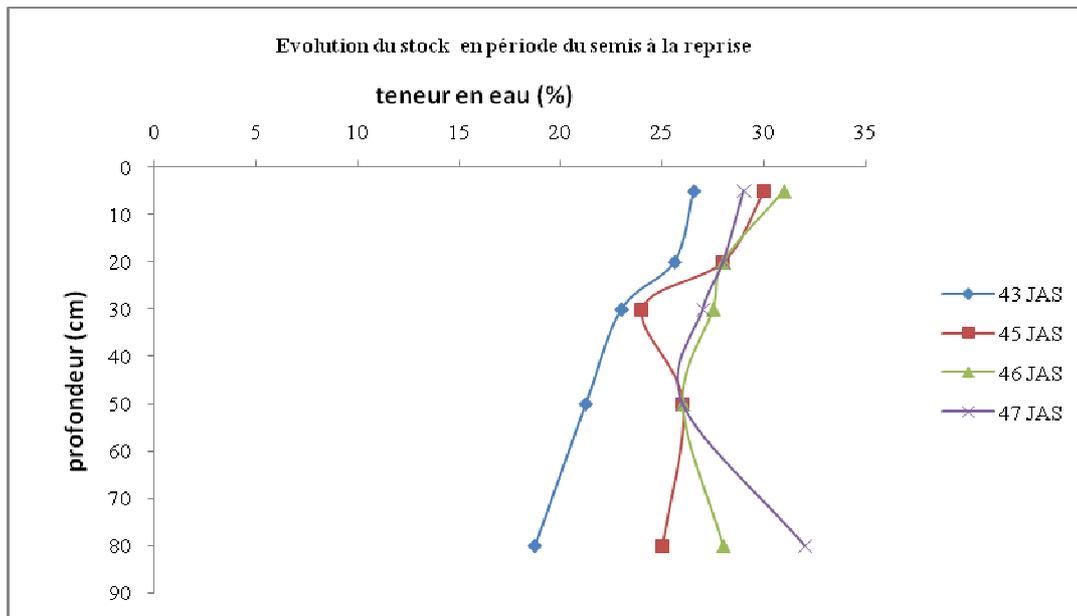


Figure 15 : évolution du profil hydrique du semis jusqu'à la reprise

b- La reprise ou début de floraison :

Dans cette période le profil hydrique du sol représente la quantité d'eau restante dans le sol après l'extraction maximale. Le profil hydrique du sol de cette période montre que l'humidité du sol est toujours inférieure à celle correspondante à la capacité au champ et supérieure au point de flétrissement permanent jusqu'à la profondeur. Par conséquent, on peut supposer que la diminution de l'humidité volumique, est due principalement à la remontée d'eau par capillarité (figure 16).

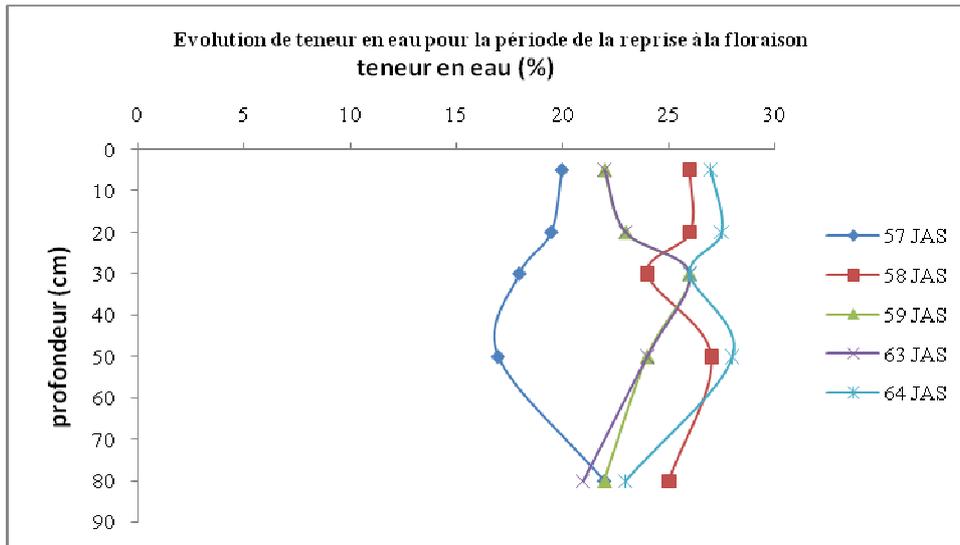


Figure 16 : évolution du profil hydrique pour la période de la reprise à la floraison

c- La fin de floraison à la maturation :

Dans cette période le profil hydrique montre que l'humidité du sol est toujours inférieure à celle correspondante à la capacité au champ jusqu'à la profondeur de 80cm, et supérieure au point de flétrissement permanent. Ceci, nous laisse penser que l'extraction racinaire s'est effectuée jusqu'à 100cm (figure 17).

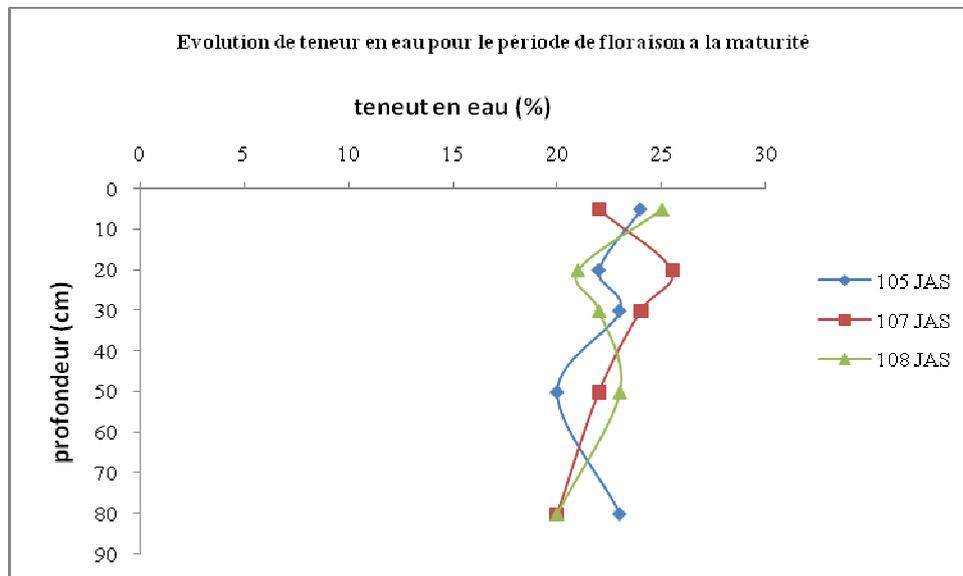


Figure 17 : le profil hydrique pour le période de floraison à la maturité

IV.4.2 Comparaison de l'humidité entre l'intérieur et l'extérieur du lysimètre :

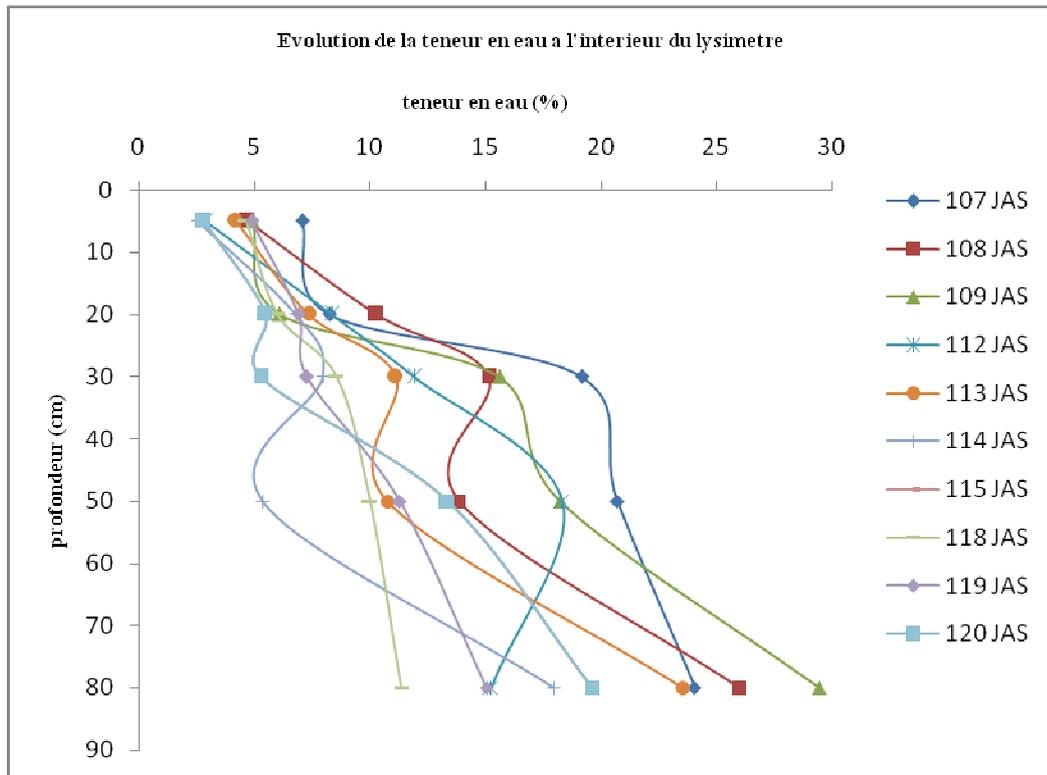


Figure 18 : Le profil hydrique à l'intérieur du lysimètre

La comparaison entre l'évolution de l'humidité à l'intérieur et à l'extérieur de la case lysimétrique (figure 18 et 19) montre que l'humidité est plus importante à l'intérieur par rapport à l'extérieur surtout dans les horizons profonds. On peut expliquer ce phénomène par l'effet des limites artificielles (les murs et les bases de lysimètres), **Ward, 1971**, ces limites ne permettent pas la circulation latérale de l'eau.

Pour l'intérieur du lysimètre, l'humidité peut atteindre 30% au 118^{ième} JAS, par contre, l'humidité hors lysimètre enregistre une humidité de 20% comme maximum.

On voit aussi que les humidités sont faibles en surfaces puis augmentent en profondeur, cela s'explique par le fait que, les premiers couches sont sollicitées et elles sont sensibles à toute variation de perte (évaporation) ou de gain (irrigation), en plus de l'extraction et de l'absorption de l'eau qui sont liées à la densité racinaire

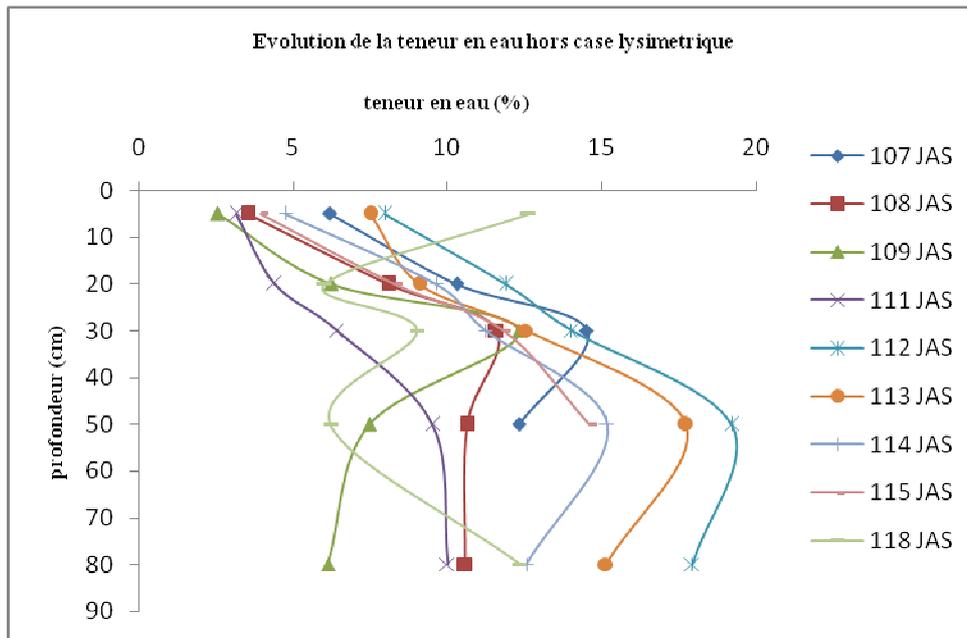


Figure 19: Le profil hydrique à l'extérieur du lysimètre

IV.4.3 Stock d'eau :

La quantité d'eau contenue dans une couche de sol (0 – 80cm) et qui est représentée par le stock hydrique. Elle est mesurée par des prélèvements à la tarière (différence en teneur en humidité) dans la couche de sol considérée.

On remarque une stabilité dans le stock pour les 70^{ième} JAS, à partir de 80^{ième} JAS on observe une variation, mais, il n'est pas considérable (de 150 mm à 125 mm) malgré les conditions climatiques sévères dans la région. La variation du stock est présentée dans la figure 20. La représentation des stocks d'eau cumulés, explicite mieux l'importance de notre réservoir sol et sa capacité de rétention.

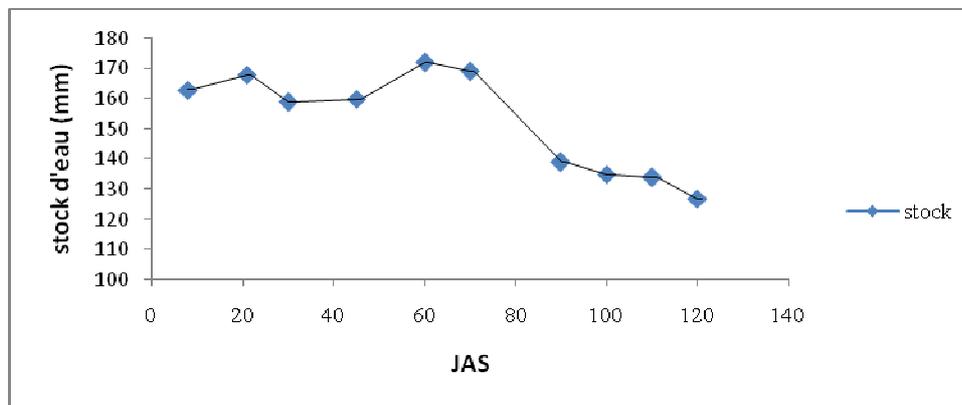


Figure 20 : variation de stock durant la campagne

IV.5 Potentiel hydrique :

L'évolution de la tension du sol pour les couches superficielles (figure 21) nous permet de dire que la tension du sol pour la couche allant de 0 à 30 cm diminue pratiquement après chaque apport d'eau.

Pour les horizons profonds (30 à 80cm), figure 22, nous remarquons que la tension du sol pour la période allant de 86 JAS jusqu'à 106 JAS a connu une légère fluctuation qui ne dépasse pas la valeur de 100 Hpa. Donc, durant cette période on remarque un léger dessèchement du sol.

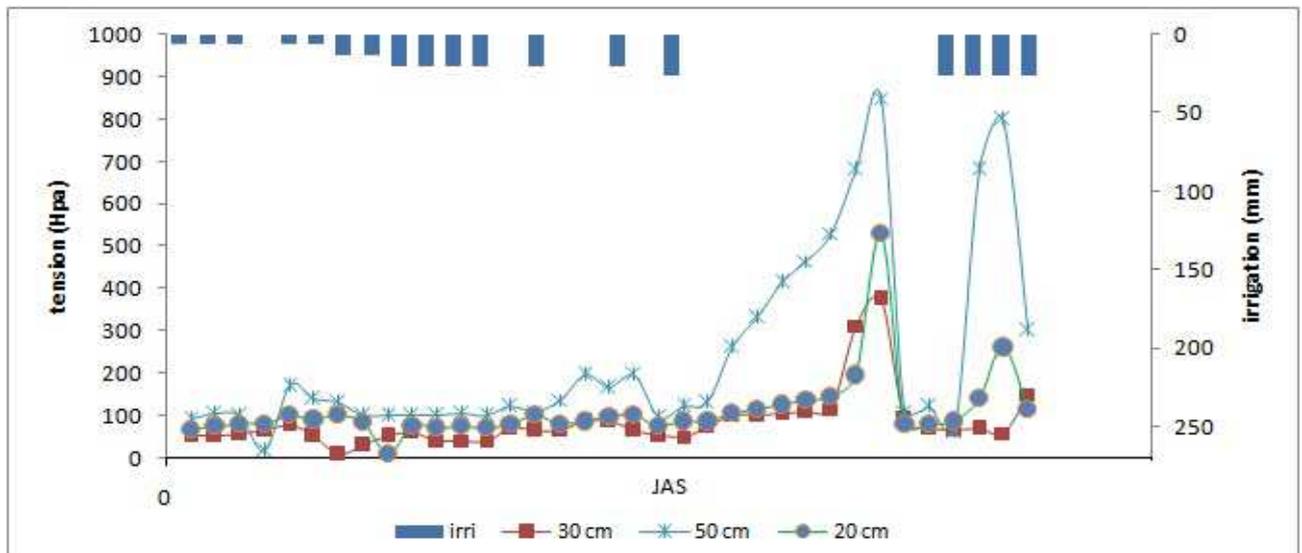


Figure 21 : évolution de la tension du sol pour les horizons superficiels

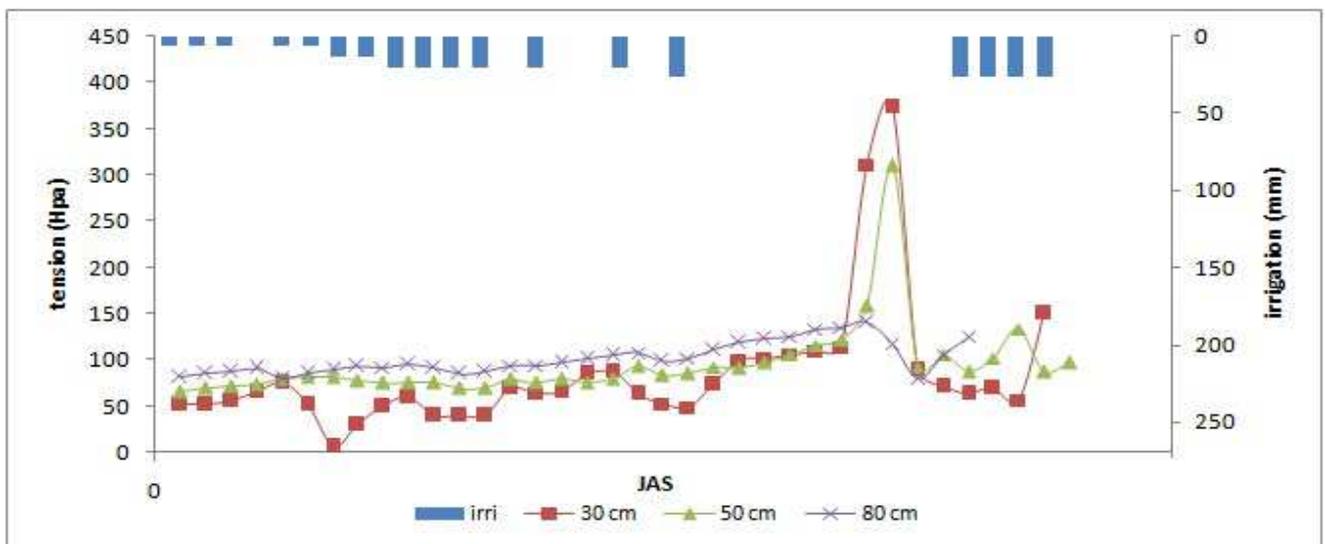


Figure 22 : évolution de la tension du sol pour les horizons profonds

Mais, à partir de 106 JAS jusqu'à la fin de l'essai, on observe une augmentation de tension du sol qui atteint les 800 Hpa. Ce qui signifie que le dessèchement du sol est important durant cette phase. Concernant l'horizon profond, nous remarquons pour les profondeurs 80cm que la tension du sol n'a pas dépassé 150 Hpa sur tout le cycle. Ce qui signifie que le sol est humide au niveau de cette zone, cela peut être dû aux apports d'eau et à l'absence des effets de l'évapotranspiration en profondeur.

On peut constater donc, que c'est en surface que le dessèchement du sol est important, cela peut être expliqué par le processus d'évaporation qui est plus important dans cette couche, ainsi que les prélèvements racinaires qui s'effectuent essentiellement dans cette zone de forte densité racinaire.

Généralement les agriculteurs se réfèrent à l'apparence de la couche superficielle pour pratiquer l'irrigation, mais ils ne se réfèrent pas à la couche profonde où s'accumule les eaux percolées. Ce problème s'aggrave dans le cas des sols sableux où l'infiltration est rapide. Parce qu'il y a une favorisation des remontées capillaires qui vont conduire à la salinisation des sols.

D'autre part, il faut noter que les tensiomètres présentent des seuils d'enregistrement des tensions, seulement la succion à -850 hPa /2.9 pf sont indiquées dans la zone non saturée (peu d'eau est restée dans les sols sableux par contre, l'eau reste toujours dans les sols avec d'autres textures, cependant l'eau est également disponible pour les plantes.

Dans les sols sableux la capacité de rétention est, généralement faible ce qui augmente la tension jusqu'au plus de -850 hpa. Dans ce cas, le tensiomètre est incapable d'indiquer la succion imposée par la plante. Donc, les tensiomètres sont inutiles dans les sols sableux avec des climats très sévères.

En fin, il faut signaler les manipulations fastidieuses lors de l'installation et l'utilisation des tensiomètres, il nécessite le remplissage quotidien pour éviter le désamorçage de tube, sans la présence des bulles d'air à l'intérieur de tube pour ne pas falsifier les résultats.

IV.6 Le bilan hydrique de la culture de blé dur :

Dans le cas de stabilité de la variation du stock d'eau dans le sol, la réserve en eau est identique avant et après culture.

L'équation du bilan hydrique de la culture de blé peut s'écrire comme suit :

$$ETM = I + P - D \dots\dots\dots(32)$$

D'où : ETM : évapotranspiration maximal

I : irrigation

D : drainage

Les résultats obtenus du bilan hydrique cumulé est présenté dans le tableau 14 :

Tableau 14 : bilan hydrique du blé dans la région d'Adrar (08/12/2007 au 14/04/2008)

I (mm)	D (mm)	ETM (mm)	% de l'eau drainée	% de l'eau consommée
1157,46	359,24	798,22	32	68

On remarque que pour une culture conduite à l'ETM, la quantité évacuée par drainage est importante. Elle peut atteindre 360 mm avec un pourcentage de 32%, en plus, la quantité consommée est de 798 mm.

Le bilan hydrique est représenté à partir du stade levée jusqu'au stade maturation (figure 23) la lame d'eau d'arrosage maximale journalière a atteint 17,19mm.

Les courbes d'arrosage et de consommation suivant la même allure. Elles sont irrégulières et plus importantes aux stades intermédiaires. Par contre, la fraction de drainage suit une allure plus stable.

Comparativement, aux résultats obtenus par **Laaboudi** (2001), on n'observe qu'une légère différence avec notre résultat notamment dans les fractions d'eau consommées et lessivées.

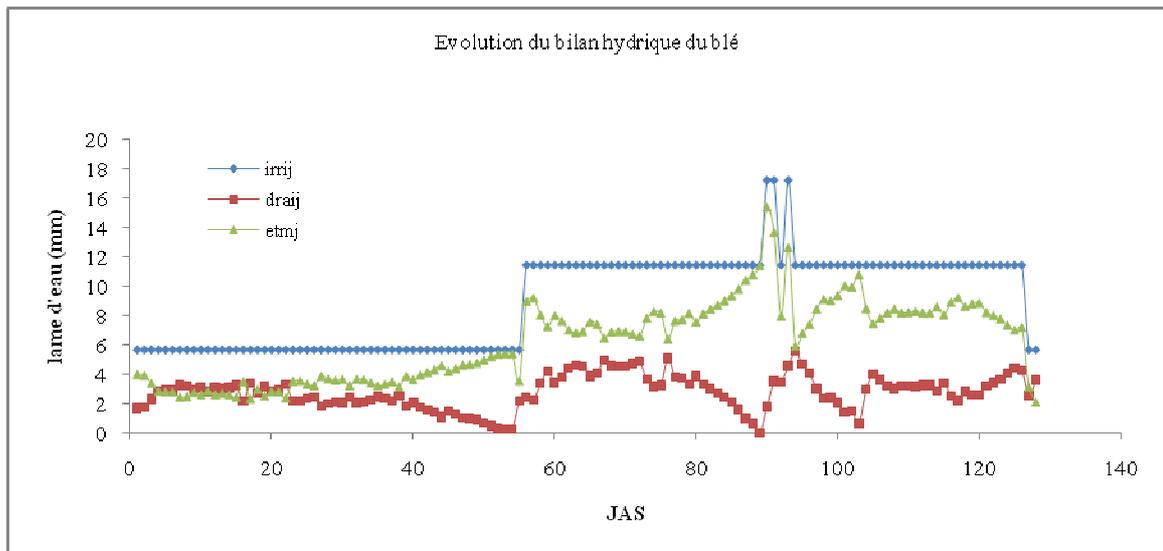


Figure 23: évolution des différents paramètres du bilan hydrique du blé dur dans la région d’Adrar

IV.6.1 Evapotranspiration potentiel :

La mesure de l’ETP est faite à la station météorologique de l’INRAA Adrar.

On remarque une fluctuation presque journalière et présente un ETP cumulé de 687,76mm. Le graphe suivant montre l’évolution de l’ETP durant la période expérimentale (figure 24).

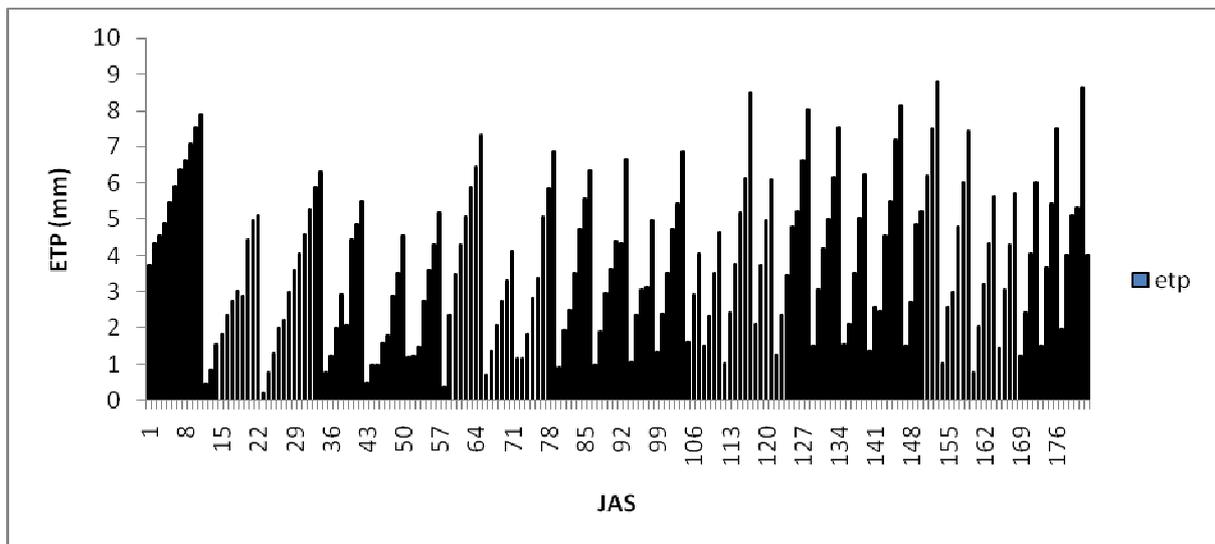


Figure 24: Evolution de l’ETP durant l’essai

IV.6.2 Evolution journalière de l'ETM : Le suivi du bilan hydrique est effectué continuellement du stade levée, jusqu'au stade récolte durant la campagne 2007/2008.

IV.6.3 ETM moyenne journalière et cumulée : (tableau 15)

On remarque qu'il y a un accroissement de la consommation en eau de la culture du blé tout au long de son cycle et aussi au sein du même stade végétatif. Cet accroissement devient plus sensible à partir de la montaison.

Tableau 15 : valeurs de l'ETM du blé en fonction des stades végétatifs

Stade végétatif	ETM cumulé (mm)	ETM moyenne journalière (mm/j)
3 feuilles	19,75	3,29
tallage	34,93	2,68
montaison	50,45	3,36
épiaison	191,91	5,48
floraison	51,41	7,34
grain laiteux	210,73	9,16
grain pâteux	275,8	9,15
maturité	177,51	7,8

La consommation est différente selon le stade, mais elle est très importante au stade du grain laiteux et pâteux parce que ces stades sont plus longs par rapport aux autres stades en plus, il est considéré comme un stade critique à la consommation en eau.

La figure 25 présente l'évolution cumulée de l'ETM et de l'ETP. On observe que l'ETM reste inférieur à l'ETP jusqu'au 60^{ième} JAS à partir du quel l'ETM cumulé surmonte l'ETP. Ceci peut s'expliquer par les apports en eau qui mettent la culture en confort hydrique.

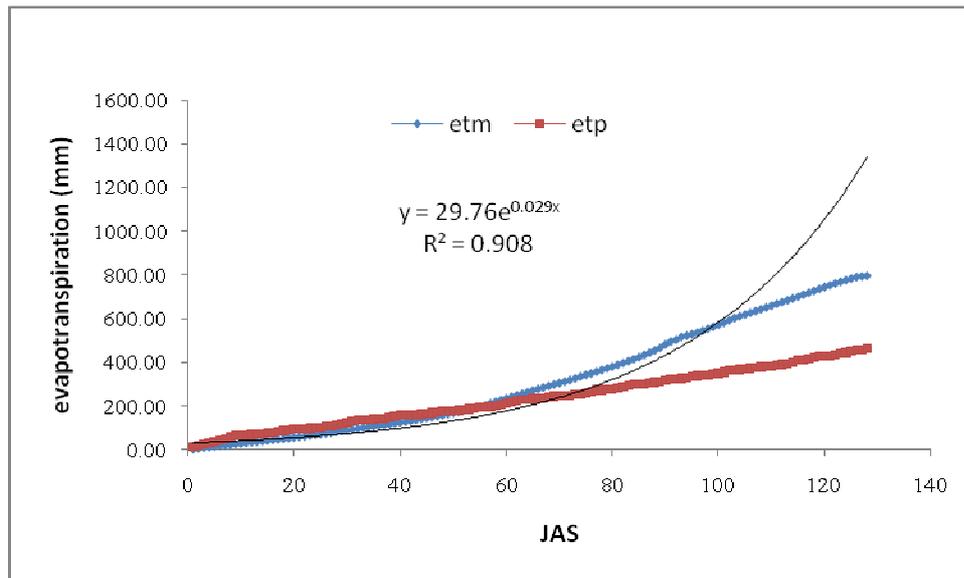


Figure 25 : Evolution des ETP et ETM cumulé durant le cycle

La campagne de mesure 2008 a été caractérisée par une période sèche importante, située entre le 12 avril et le 24 mai. Cette phase est marquée par une diminution et augmentation rapide de la teneur en eau qui débouche sur de faibles humidités sur la parcelle. C'est pas seule l'évaporation intervient dans la perte en eau du sol mais, la transpiration s'ajoute à l'évaporation, même si la végétation n'est pas très abondante. La Figure (25) présente l'évolution temporelle de l'évapotranspiration maximale journalière cumulée durant le période considérée. Il apparaît que cette variable (ETM_{cum}) suit une fonction exponentielle du type:

$$ETM_{cum} = ae^{bt} \text{ avec un coefficient de détermination élevés } R^2 = 0,90.$$

IV.7 Coefficient cultural :

Nous avons établi sur le tableau (16) les valeurs du Kc en fonction des stades végétatifs à partir de la date de semis. Ces valeurs sont presque toutes inférieurs à l'unité, variant entre 0,65 et 1,21. Nous avons utilisé l'équation (09, cité au chapitre I).

Sur la figure (26), nous remarquons que, la courbe représentative des valeurs de Kc en fonction du temps de développement du culture, à la même forme que la courbe caractéristiques de toutes les cultures (F.A.O, 1977 in **Kutsch, 1978**), à savoir : les faibles valeurs de Kc sont obtenues au début et en fin de cycle de développement (semis et récolte) et que la forte valeur de Kc est atteinte vers le dernière tiers du cycle végétatif de la culture (80 jours après le semis). Celle-ci, correspond à la période pendent laquelle l'activité métabolique

est maximale. Malgré cette détermination, les valeurs présentées ci-dessus, suggèrent encore quelques recherches sur la consommation en eau.

Tableau 16 : évolution du K_c du blé en fonction des stades végétatifs

stade	ET0 mm/j	ETM mm/j	K_c
semis	4,4	3,00	0,68
3feuilles	4,5	3,39	0,75
tallage	4,1	2,69	0,65
montaison	4,3	3,36	0,78
épiaison	4,6	5,54	1,21
floraison	8,4	7,35	0,87
grain laiteux	13,5	8,74	0,65
grain pâteux	14,05	9,11	0,65
maturité	11,75	7,71	0,66

Source : **Laaboudi**, 2001

Les valeurs de l'ET0 sont inspirées à partir des travaux de **Laaboudi** 2001 sur luzerne réalisées en même conditions de celles de notre essai.

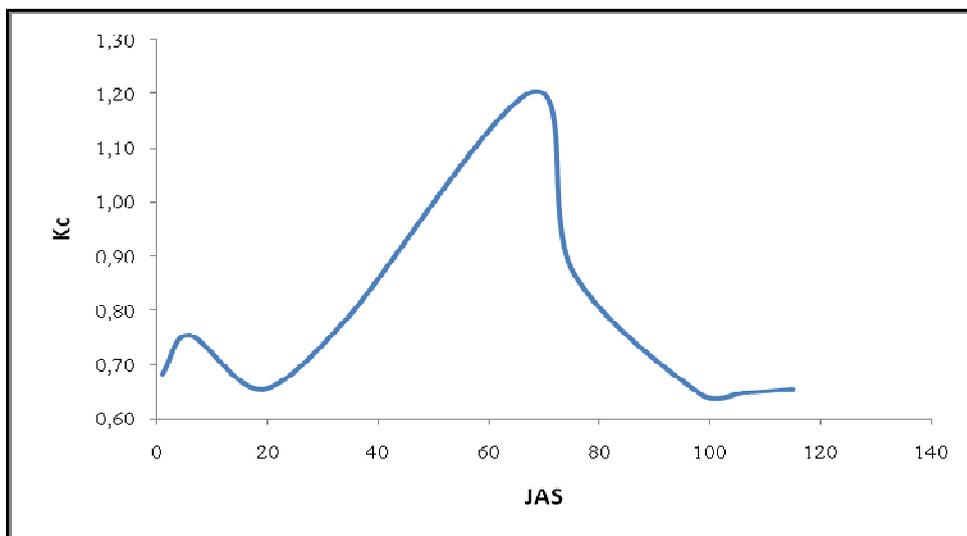


Figure 26 : Evolution du K_c en fonction du stade de développement végétatif du blé

Dans ce chapitre nous avons suivi les différents paramètres de bilan hydrique : (humidité du sol, évapotranspirations) et le potentiel hydrique. En plus, nous faisons une comparaison entre les ETM mesurés et simulés.

*Chapitre V : Simulation des différents
paramètres de bilan hydrique*

Chapitre VI : Simulation des différents paramètres de bilan hydrique :

L'utilisation de modèles peut être un substitut à l'expérimentation souvent lourde: la simulation donne une réponse à un problème posé dans un contexte précis. L'expérimentation est nécessaire au calage et à la validation du modèle, qui permet ensuite de tester différents scénarios.

V.1 Calage du modèle :

Le calage est une opération essentielle permettant de déterminer un certain nombre de paramètres du modèle afin de pouvoir l'utiliser pour une étude de cas (Nemeth, 2001), Le modèle STICS nous permet de caler les paramètres par le jeu sur les données observées. Il nous permet de caler de 1 à 5 paramètres (parmi ceux disponibles dans les 4 fichiers d'entrées), sur une variable observée (saisie précédemment dans un fichier observé). L'algorithme de calcul utilisé est la méthode du simplexe et le critère utilisé est celui des moindres carrés

$$\sqrt{\sum_1^n (x_{\text{observé}} - x_{\text{calculé}})^2} \dots\dots\dots (33)$$

STICS donne la possibilité d'optimiser ou de caler la plupart des paramètres d'entrées ; Ces paramètres sont ceux que l'on trouve dans les 4 fichiers d'entrées :

Param.par pour les paramètres structuraux,

plante.plt pour les paramètres plantes,

essai.tec pour les paramètres techniques,

param.sol pour les paramètres sol.

L'optimisation se lance sous la forme d'une fenêtre Dos dans laquelle le modèle est lancé automatiquement. L'optimisation s'arrête quand l'écart entre le critère de chaque itération a atteint un minimum de 10^{-4} ou après avoir effectué 1000 itérations. On peut visualiser le résultat de l'optimisation dans Sorties-Visualiser par comparaison entre le *fichier.sti* simulé et le *fichier.obs* observés.

V.2 Paramètres climatiques : (annexe)

Les variables climatiques du modèle sont introduites à pas de temps journaliers. Ces variables sont : la température minimale (C°), la température maximale (C°), pluies (mm), évapotranspirations potentiel (mm), l'humidité relative (%) et le rayonnement global (Mj/m²/j).

Les données météorologiques utilisées ont été récupérées de la station météo au niveau de l'institut national de la recherche agronomique (INRAA) station d'Adrar (2007-2008).

V.3 Les paramètres liés au sol :

Les caractéristiques du sol introduit sont : teneur en argile A (%), teneur en CaCO₃ de la couche minéralisante (%), PH du sol, Hccf : humidité à la capacité au champ de chaque horizon (% pondéral), Hminf : humidité au point de flétrissement permanent de chaque horizon (% pondéral), épaisseur de chaque horizon (cm) avec les densités apparentes correspondantes. Les autres paramètres sont inspirés à partir des travaux de **Laaboudi**, 2001.

Tableau 17 : Les paramètres liés au sol

paramètre	Grandeur (unité)
A	20%
CaCO ₃	10%
Hccf	15%
Hminf	5,5%
RU	128 mm (lame d'eau)
da	1,61

V.4 Les paramètres propres à la plante :

Les paramètres introduits dans le modèle sont regroupés dans le tableau suivant :

- Les caractéristiques variétales et agronomiques ;
- Les besoins de la plante en température ;
- Croissance et rendement ;
- Les besoins en eau et en azote ;
- Les valeurs mesurées du LAI.

La plus part des ces données issues de la littérature ou la notice utilisateur WINSTICS 2002 ou données par le auteurs de STICS (**Brisson** et al., 1998). Ce dernier offre la possibilité d'une optimisation numérique des paramètres pour lesquels aucune référence n'est trouvée. Elle se fait dans un intervalle de valeurs données a priori par les auteurs du modèle.

V.5 Les paramètres techniques :

Les paramètres techniques concernent les itinéraires techniques utilisés lors de la pratique de la culture tel quels :

- Travail de sol et apports organiques
- Les dates de différents stades observés
- Les pratiques d'irrigation et les doses en eau
- Les apports de fertilisation
- Récolte et techniques particuliers

V.6 Calage de LAI :

STICS permet de réaliser une interpolation à partir d'un fichier de valeurs observées discontinue dans le temps, celui-ci peut générer un fichier des valeurs continues de LAI. Le résultat du calage est représenté dans la figure 27.

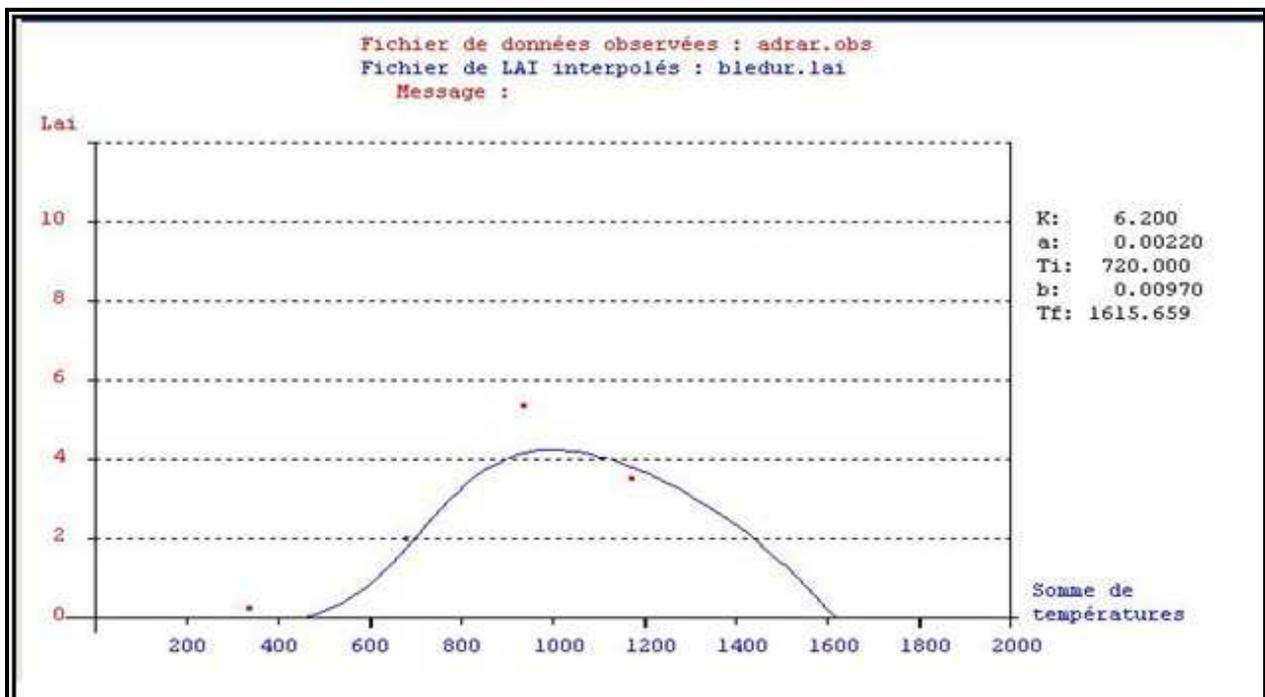


Figure 27 : calage du LAI

La courbe du LAI évolue selon une courbe en “cloche” (**Mailhol, 2005**) de 0 au moment de l'émergence jusqu'à atteindre des valeurs de 4.5 à 5 m²/m² au voisinage de la floraison sans restriction hydrique (Figure 27). Il décroît ensuite plus ou moins lentement (selon le niveau de disponibilité hydrique) au cours d'une période appelée sénescence après avoir atteint un pseudo-pallier pouvant durer 1 à 3 décades. Il convient de savoir que la consommation maximale est atteinte dès que le LAI dépasse la valeur de 3.5.

En plus, nous avons fait une comparaison entre le LAI mesuré et LAI simulé, le résultat est présenté dans la figure (28) qui montre une corrélation étroite entre les deux LAI, avec un coefficient de détermination de $R^2 = 0,918$.

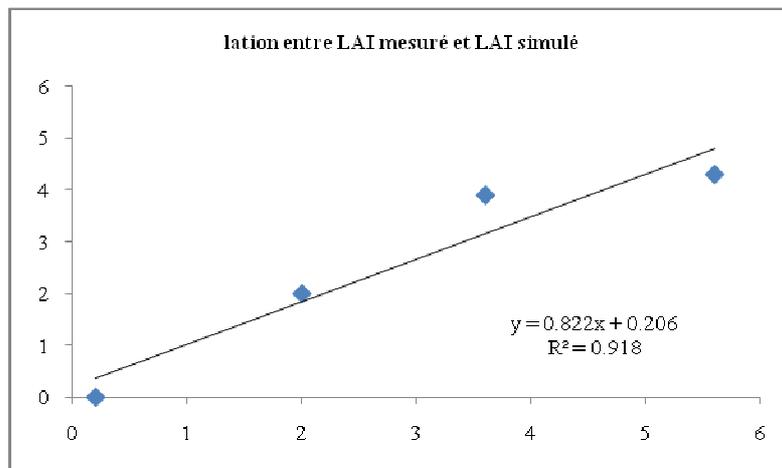


Figure 28 : relation entre LAI mesuré et LAI simulé

V.7 Validation du Modèle

La validation sert à vérifier les capacités de reproduction, d'extrapolation et de prédiction du modèle pour les conditions dans lesquelles il est prévu de l'être utilisé par la suite. Par validation il faut entendre donc la vérification de l'ajustement entre grandeurs simulées et observées à partir de séries de données indépendantes de celles ayant servi au calage (**Nemeth, 2001**). La validation du modèle permet de tester sa robustesse dans des scénarios variés. Cette robustesse est définie comme la capacité de l'outil à fournir des résultats satisfaisants dans une gamme étendue de conditions. Pour cela, il est nécessaire de se doter d'une base de données indépendante. Sachant que la qualité du jeu de données utilisé pour la validation était très large et variée (**Garcia de Cortazar Atauri et Brisson, 2007**).

La validation est pour vérifier que la structure ou les sorties de modèle sont acceptable pour son usage prévu parce qu'il répond à des exigences de performance spécifiés (**Mitchell, 1997 ; Edward et Rykiel, 1996**).

V.8 Simulation de développement du blé dur :

A fin d'évaluer l'hypothèse simplificatrice étanche du sol en un réservoir pour la culture de blé, donc, le sol est considéré comme un seul réservoir, dont les ressources hydriques sont simulés.

STICS est monodimensionnel, il n'est pas possible de modifier la largeur des réservoirs.

Le cycle de développement du blé dur a été paramétré car il a un impact sur le fonctionnement physiologique de la plante. Les dates de semis et de maturité sont forcées à partir des données observées parce qu'il s'agit d'une variété précoce en plus, le cumul des températures nécessaires à chaque stade est assuré grâce à des températures élevées.

V.9 Simulation des différents paramètres du bilan hydrique :

V.9.1 Evolution du stock :

Dans cette partie, nous discuterons les évolutions des réserves simulés par STICS pendant la période végétative du blé. De plus, nous introduisons dans les graphiques les valeurs mesurées de la réserve afin de procéder à une comparaison entre les valeurs « simulées – observées ». Cette confrontation nous permet de tester la fiabilité du modèle STICS à restituer les données du terrain. De plus, nous avons ajouté les deux réserves « seuil » à capacité au champ (H_{cc}) et au point de flétrissement (H_{pf}) ainsi que (les irrigations).

Le modèle a pour but de représenter l'évolution de la réserve en eau du sol au cours du temps.

A fin de valider les résultats du modèle, nous avons également comparé l'évolution des stocks simulés et les stocks observés sur la couche de (0 – 80 cm), en incluant les apports d'eau tel que les irrigations. La comparaison des stocks observés et simulés est indiquée dans la figure (29)

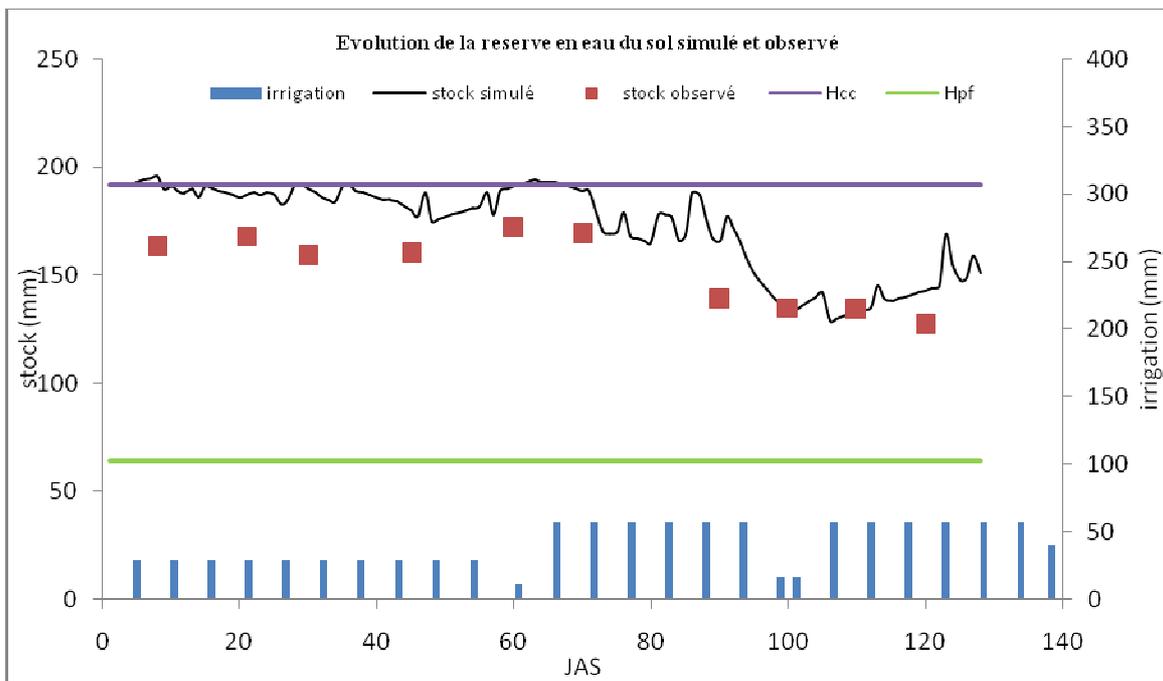


Figure 29 : évolution du stock simulé et observé

Dans notre cas, nous avons négligé le ruissellement. La croissance du système racinaire a été simulée selon un profil de densité vraie.

La simulation des stocks (sur 80 cm) paraît globalement satisfaisante dans un intervalle de confiance de 5% (figure 29). On observe malgré tout une surestimation du stock de début de cycle (jusqu'au mois du mars : floraison) puis un alignement entre les deux stocks ce qui a été observé par **Pelligrino** en 2003, avec le modèle RIOU et **Filali** 2004, avec le modèle PILOTE. Cette surestimation peut être expliquée par un retard dans la détection du stress du blé lié à la surestimation des stocks disponibles (**Celette**, 2003). La régulation de la transpiration est alors elle aussi retardée. En plus, le ruissellement fait la différence, car il n'est pas pris en compte.

D'autre part, cette surestimation des stocks simulés par le modèle semble être due à des erreurs de simulation ou de mesure.

Nous remarquons dans l'ensemble qu'au début du cycle les stocks simulés par STICS avoisinent le stock à la capacité au champ Hcc jusqu'à environ le 70^{ième} JAS. Puis commence à diminuer progressivement. Les irrigations apportées ont permis le maintien de la plante en confort hydrique sans arriver au stock du point de flétrissement.

A fin de justifier nos interprétations, nous avons réunis les résultats des réserves en eau du sol et établi une régression linéaire qui permet de tester la confrontation entre les valeurs des réserves simulées et mesurées.

V.9.2 Confrontation entre réserves simulés et observés :

La confrontation entre stock simulé et observé a abouti à l'équation (34) avec un coefficient de détermination (R^2) acceptable :

$$\text{STOCK observé} = 0,63 \text{ STOCK simulé} + 44,66. \quad (R^2 = 0,852) \quad \dots\dots\dots (34)$$

La figure (30) représente le résultat de confrontation.

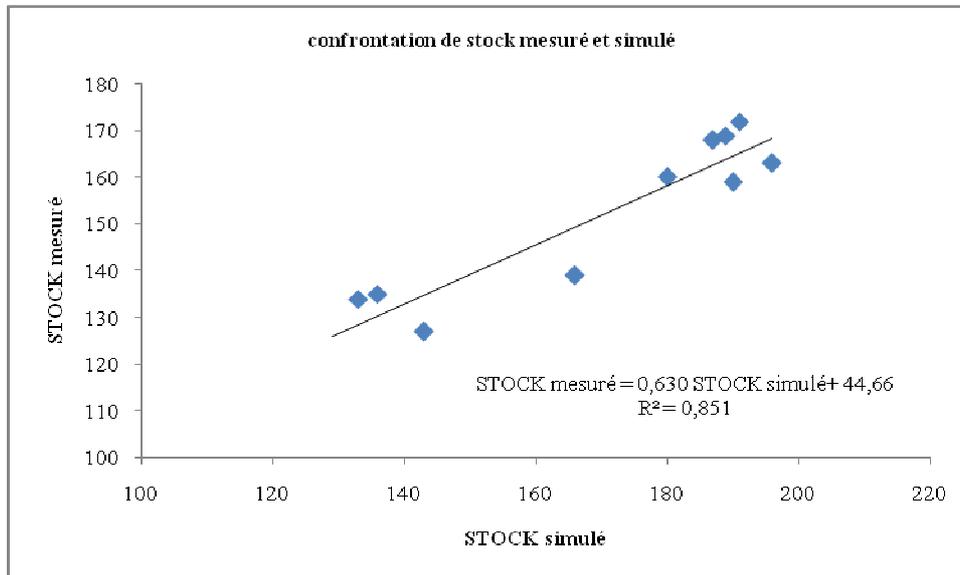


Figure 30 : confrontation entre les réserves simulées et mesurées

L'analyse de la variance de la régression obtenue vient ainsi confirmer que le modèle obtenu est acceptable.

Les simulations par le modèle semblent être assez concordantes dans l'ensemble malgré que les réserves diminuent fortement en fin de cycle végétatif en raison probablement d'une différence liée à des fonctions de stress.

V.9.3 Simulation des évapotranspirations :

Le modèle STICS permet de calculer les évapotranspirations (ETR, ETM, ES et TR) tel que :

ETR : évapotranspiration réelle

ETM : évapotranspiration maximale

ES : évaporation du sol

TR : transpiration de la plante

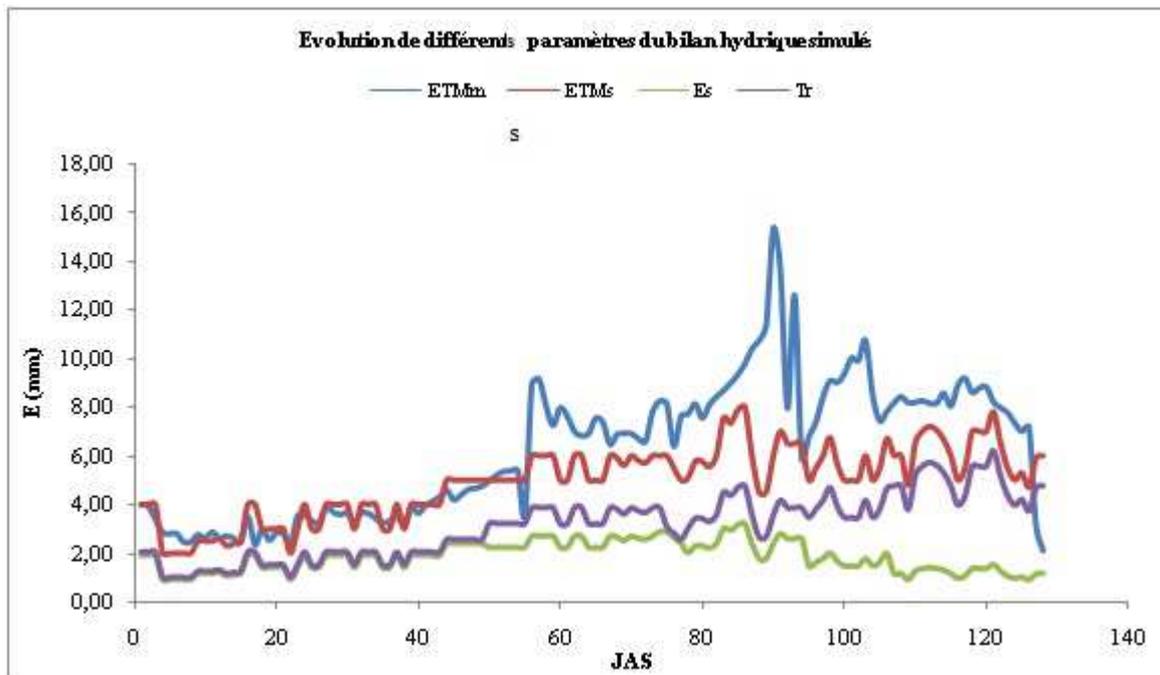


Figure 31 : évolution journalier des évapotranspirations

La figure 31 montre que pour la période allant du semis jusqu'au 56^{ième} J.A.S la variation de l'ETM simulé et de l'ETM observé est presque nulle. Ceci est dû sans doute au confort hydrique adopté pour les irrigations durant cette période et qui entraîné des drainages à la base du profil racinaire.

Nous observons aussi durant cette période une stabilité au niveau de l'évaporation du sol et la transpiration de la plante. On note un moyen environ de 2mm/j avec un léger avantage pour la transpiration.

Du 56^{ième} jour à la fin du cycle on enregistre une variation considérable de l'ETM observé, il atteint 15,37 Mm/j le 90^{ième} J.A.S. il est suivi par une légère variation de l'ETM simulé.

On admet que le modèle STICS sous-estime les évapotranspirations dans un climat saharien où les conditions naturelles sont très sévères. Le tableau 17 récapitule les résultats de simulation.

Tableau 18 : les valeurs cumulées des évapotranspirations

ETMm (mm)	ETMs (mm)	Es (mm)	Tr (mm)	Dr (mm)
798,21	553,97	217,6	350,34	217,01

V.9.4 Simulation des irrigations :

Le modèle peut être utilisé à fin de définir une stratégie d'irrigation visant à optimiser la production. STICS permet d'établir un calendrier des arrosages automatisés par la détermination d'un indice de stress hydrique, en-dessous duquel on déclenche une irrigation en mode automatique, et de la quantité maximale d'eau à chaque arrosage.

STICS propose la possibilité de gestion automatique d'irrigation pour cela on doit adopter des scénarios :

- Le pourcentage du RU au-dessous de la quelle l'irrigation se déclenche.
- la dose qui permet un comblement total du déficit et restitution complète de la réserve.

Dans notre cas, le traitement est conduit à l'ETM quand la réserve utile du sol est épuisée au seuil de 20%. Donc, le modèle prévoit une irrigation de 30 mm à chaque fois, ce qui assure la reconstitution complète de la réserve.

Le calendrier d'arrosage estimé par le modèle est montré dans le tableau 18 comparé avec les quantités apportées.

Tableau 19 : irrigations apportés et mesurés

	quantité d'eau simulée (mm)	quantité d'eau mesurée (mm)
montaison	104	200,55
épiaison	182	275,04
floraison	52	80,22
grain pâteux	208	280,77
grain laiteux	78	80,22
maturité	182	240,66
total	806	1157,46
	69%	100%

1. **Une Efficience** liée aux apports d'eau exprimant le rapport entre les rendements en grain et le volume total d'eau (irrigation) apportées pendant le cycle de la culture :

$$E\omega = \frac{R}{\Sigma(P+I)} \dots\dots\dots (35)$$

Avec :

- $E\omega$: efficience des apports d'eau (Kg/ha/mm)
- R : rendement en grain (Kg/ha)
- I : irrigation totale (mm)

2. Une efficacité liée aux consommations d'eau exprimant le rapport entre les rendements en grains et la consommation en eau totale représenté par les évapotranspirations maximale ETM cumulées pour tout le cycle de la culture.

$$Ec = \frac{R}{\Sigma(ETM)} \dots\dots\dots (36)$$

Avec :

- $E\omega$: efficacité des apports d'eau (Kg/ha/mm)
- R : rendement en grain (Kg/ha)
- ETM : Evapotranspirations maximales (mm)

Les résultats de calcul sont présentés comme suit :

Tableau 20 : efficacité des apports et des consommations d'eau (mesurée et simulée)

	apports (mm)	ETM (mm)	Rdt (Qx/ha)	$E\omega$ (Kg/ha/mm)	Ec (Kg/ha/mm)
mesuré	1157	798	55,3	50	70
simulé	806	631	60	86	94

Nous notons qu'il existe une surestimation d'efficacité pour le rendement estimé, par contre, l'efficacité pour le rendement en grain mesuré est acceptable (tableau 20).

V.9.5 Simulation de drainage :

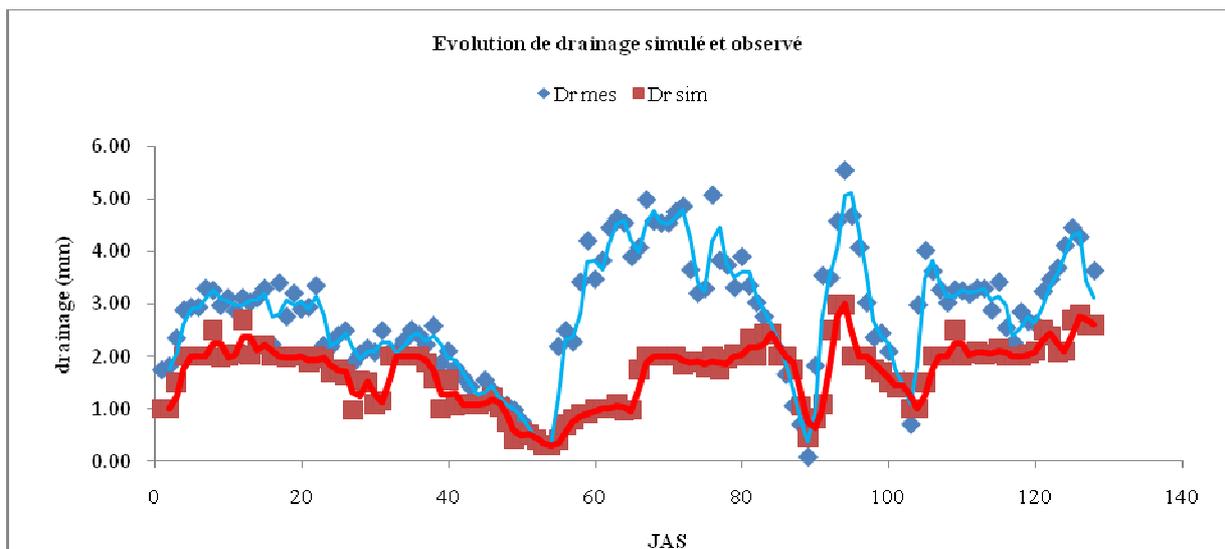


Figure 32 : évolution des drainages simulés et observés

Le modèle STICS permet de réaliser une simulation des drainages (figure 32). Cette option du modèle nous donne une idée sur les excès en eau d'irrigation. En plus, l'état de satisfaction des besoins de plante.

V.9.6 Simulation des humidités :

Les profils d'humidité (figure 33) permettent d'évaluer la répartition de l'humidité dans les horizons. Nous avons ainsi choisi 4 dates au cours du cycle de développement de la culture qui doivent permettre d'évaluer la justesse de la répartition de l'humidité entre les horizons, notamment au cours du rechargement du profil. Malgré quelques approximations, il convient de noter la bonne qualité des simulations notamment dans la répartition de l'humidité au sein des profils. La simulation des stocks n'est pas remise en cause par des phénomènes de compensation entre humidité des horizons superficiels et profonds.

Les dynamiques des horizons profonds sont les mieux représentés. Celles des horizons de surface montrent des imperfections (figure 33).

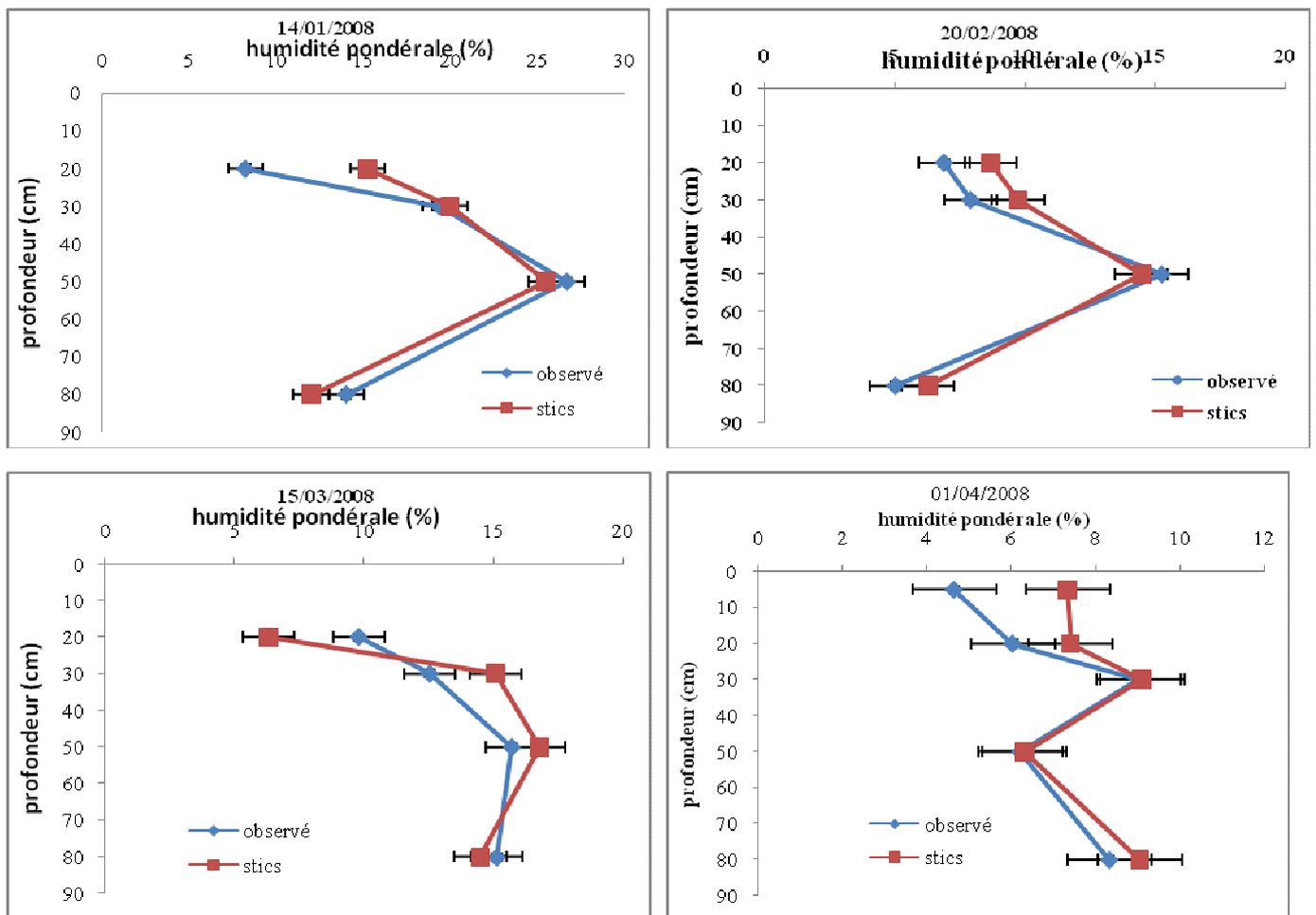


Figure 33 : profils d'humidité simulés et observés

V.9.7 Evaluation statistique :

Il nous est donc possible de voir si les performances apportées par le modèle améliorent la qualité des simulations. STICS pourra être également évalué sur les résultats observés dans la zone d'étude.

Tableau 21 : évaluation statistique des simulations des humidités pondérales par horizon par la RRMSE, le coefficient de corrélation (R^2) et l'efficacité du modèle.

Hp1	RRMSE	0,1091	
	Y =	1,15x-0,01 (37)
	R^2	0,9274	
	efficacité	0,8983	
Hp2	RRMSE	0,0671	
	Y =	0,97x+0,01 (38)
	R^2	0,9539	
	efficacité	0,8657	
Hp3	RRMSE	0,0346	
	Y =	0,84+0,02 (39)
	R^2	0,9532	
	efficacité	0,8066	
Hp4	RRMSE	0,0737	
	Y =	1,16X-0,02 (40)
	R^2	0,7493	
	efficacité	0,7031	
stock	RRMSE	0,0847	
	Y =	0,630x+ 44,66 (41)
	R^2	0,851	
	efficacité	0,7472	

L'évaluation statistique présentée dans le tableau 20 montre une hétérogénéité dans les résultats de différents horizons ; l'efficacité du modèle diminue avec la profondeur avec un coefficient de détermination R^2 égale à 0,92 pour l'horizon superficiel, jusqu'au $R^2 = 0,7493$ pour l'horizon profond.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'agriculture dans la région saharienne, et particulièrement dans la Wilaya d'Adrar a connue plusieurs contraintes. Parmi l'ensemble des contraintes affectent la céréaliculture, celle provenant de la difficulté à satisfaire les besoins en eau des cultures est très souvent majeure, surtout dans le cas où les précipitations sont rares.

L'augmentation de la production agricole passe nécessairement par l'amélioration du rendement. Elle ne peut être atteinte que par une utilisation rationnelle de l'ensemble des facteurs de production dont l'irrigation.

Le pilotage de l'irrigation est la meilleure solution pour s'échapper à la pénurie de ressources hydriques qui caractérisent cette région, le pilotage de l'irrigation repose essentiellement sur des signaux plus ou moins efficaces, tel quels ;

- Le suivi du cinétique hydrique par des mesures tensiométriques et gravimétriques du sol.
- Les indicateurs liés à l'état de la plante.
- La modélisation des processus naturels par une représentation simplifiée. Les modélisations sont facilitées par le développement informatique.

Notre travail avait pour objectif de simuler, à l'aide d'un modèle à réservoirs, le développement d'une culture de blé dur en terme de consommation en eau (ETM), des irrigations et l'évolution du stock en eau dans le sol. En plus, une évaluation de la fiabilité du modèle.

Pour cela, nous avons suivi le développement la culture de blé dur durant une campagne dans la région d'Adrar, a fin de confronter les résultats observées sur le terrain et celles simulées par le modèle STICS.

Nous arrêtons le suivi du stock jusqu'au 80 cm seulement, par ce que nous sommes limités par le matériel de travail et la profondeur du lysimètre (90cm).

Les résultats de ce travail amènent aux remarques suivantes :

- Le stock d'eau présente dans la couche allant de 0 à 80 cm est de 128 mm.
- Le stock à la capacité au champ est de : 192mm
- Stock au point de flétrissement : 64mm.

- La couche de 50 à 60 cm présente la tension la plus élevée, c'est la couche qui comporte le plus grand nombre des racines, par contre, la couche de 30 à 40 présente la plus faible tension.
- Le suivi du stock d'eau et son évolution dans le temps nous permettra de déterminer les amplitudes de cette réserve d'eau en phase d'excédent hydrique et en phase d'assèchement. Il nous permettra d'établir des schémas de circulation hydrique.
- La variation du stock a été relativement petite. Le stock au point de flétrissement n'a jamais été atteint.
- L'utilisation du tensiomètre pour le pilotage des irrigations sur les sols sableux dans la région saharienne, ne fournit pas des résultats probants, problème de désamorçage rapide des tensiomètres.
- Le suivi du potentiel de la tension dans le sol est plus distinctif dans les couches superficielles.
- La quantification des différents paramètres du bilan hydrique permet de voir que le drainage présente 32%. En outre, les consommations de la plante est de 68% dans un régime d'irrigation conduit à l'ETM.
- Le stade critique hydrique est celle de grain laiteux-pâteux, la quantité de l'ETM moyenne journalière est évalué à 9,16 mm/j.

Pour vérifier la fiabilité de simulation du modèle STICS, nous avons réalisé une comparaison entre les valeurs observées ou mesurées et les valeurs simulées par le modèle. Nous avons tiré les constatations suivantes :

- Le modèle a montré son aptitude à simuler d'une façon acceptable le rendement.
- Une bonne simulation de la croissance du LAI.
- Une mauvaise simulation d'évolution des réserves en eau en sol avec une surestimation au début de la période végétative.
- La simulation des ETM, l'évaporation et la transpiration n'est pas satisfaisante à la fin de l'essai, on note une sous estimation des ETM mesurées de 29% par rapport à ceux mesurées.

- La simulation des irrigations permet de gagner 32% des apports conduits à l'ETM.
 - Pour l'évaluation statistique du modèle elle paraît satisfaisante avec une efficience moyenne de 0,83 pour la simulation des humidités des horizons.

Nous retenons donc que le modèle STICS est un outil simple et incapable de prédire les paramètres et les variables essentiels du bilan hydrique dans la région d'Adrar. Ce qui conduit à chercher les meilleures stratégies pour l'adapter dans un contexte pédoclimatique donné.

Ce travail est une étape et d'autres démarches devront être envisagées afin de répondre aux questions posées. Pour confirmer les résultats obtenus, il semble qu'il serait très intéressant de mener d'autres expérimentations sur la culture de blé dur et sous les mêmes conditions climatiques pour pouvoir juger de l'opportunité de ce modèle dans les conditions sahariennes. En fin, il conviendra d'envisager une modélisation plus détaillée de ces flux à l'aide de modèles mécanistes. Les transferts hydriques peuvent également être pris en compte en deux dimensions de manière simplifiée.

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

1. **ALBERGEL J., PEREZ P. et VAKSMANN M., 1991.** Amélioration des modèles du bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelien zone* (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). Ed : IAHS. no. 199, PP 483-496.
2. **ALSHARHAN S. A. et WOOD W. W., 2003.** Water resources perspectives: evaluation, management and policy. 405P.
3. **BENFEKIH L., 2006.** Recherches quantitatives sur le criquet migrateur *Locusta migratoria* (Orth. Oedipodinae) dans le Sahara algérien. Perspectives de lutte biologique à l'aide de microorganismes pathogènes et de peptides synthétiques. Thèse doctorat, université de limoges, France. 123 P.
4. **BENHADJ I., 2008.** Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech. Thèse doctorat, Université de Toulouse III. 283P + annexes.
5. **BENKACI A. T., 2001.** Contribution à la modélisation de la relation pluie-débit au pas du temps mensuel et journalier par les modèles conceptuels et les réseaux de neurones. Thèse de magister, Inst Nat Agr, El-Harrach. 152P.
6. **BERGERON D., 2005.** Mieux irriguer avec les tensiomètres. Direction régionale du MAPAQ de la Capitale-Nationale, France. 7 P.
7. **BERKAL I., 2006.** Contribution à la connaissance des sols du Sahara d'Algérie. thèse magister, Inst Nat Agr, El-Harrach. 104P et annexes.
8. **BOUGHTON W., 2005.** Catchment water balance modeling in Australia 1960–2004. *Agricultural Water Management*. 71, PP: 91–116.
9. **BOUTADARA Y., 2009.** Élaboration d'un système d'informations géographiques sur le système de captage traditionnel dans les oasis sahariennes (cas des foggaras de la région du Touat, Adrar). Thèse magister, universite des sciences et de la technologie. Mohamed Boudiaf, Oran.
10. **BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFFROY M. H., RUGET F., NICOULLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DURR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D, CELLIER P., MACHET J.-M., MEYNARD J. –M. ET DELECOLLE R., 1998.** STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18. PP: 311-346.

11. **BRISSON, N., GARY, C., JUSTES, E., ROCHE, R., MARY, B., RIPOCHE, D., ZIMMER, D., SIERRA, J., BERTUZZI, P., BURGER, P., BUSSIERE, F., CABIDOCHÉ, Y. M., CELLIER, P., DEBAEKE, P., GAUDILLERE, J. P., HENAULT, C., MARAUX, F., SEGUIN, B., AND SINOQUET, H. (2003).** An overview of the crop model STICS. *Euro. Jour. of Agro.* 18, 309-332.
12. **BRISSON, N., RUGET, F., GATE, P., LORGEAU, J., NICOUILLAUD, B., TAYOT, X., PLENET, D., JEUFFROY, M. H., BOUTHIER, A., RIPOCHE, D., MARY, B., AND JUSTES, E. (2002).** STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69-92.
13. **CELETTE F., 2003.** Evaluation d'un modèle à réservoirs pour simuler le bilan hydrique d'une vigne enherbée en climat méditerranéen. DEA, INAPG, France. 19 P.
14. **CHOURGHAL N., 2003.** Modélisation agro météorologique du bilan hydrique par simulation de la pluviométrie et de l'évapotranspiration potentiel de la région d'Alger. Thèse magister, Inst. Nat. Agr., El-Harrach. 228 P.
15. **CUI Y.-J., ZORNBERG J. G., 2008.** Water Balance and Evapotranspiration Monitoring in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. *Geotech. Geol. Eng.*, 26, PP :783–798.
16. **D.S.A. Adrar (2008)** (direction des services d'agriculture), Adrar.
17. **DAMAGNEZ, J. 1968.** Les bilans hydriques et énergétiques et l'étude des facteurs du milieu. *Agroclimatological method proceeding of the Redding Sym.* UNESCO, Paris.
18. **DAOUD Y. et HALITIM A. 1994.** Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Sécheresse* 5,3 PP : 151-160.
19. **DELLI R., 2003.** Optimisation de l'irrigation en conditions de ressources en eau limitées. Application sur deux types de céréales : blé dur (var. Vitron) et Sorgho (var. Argence). Thèse magister, Inst. Nat. Agr., El-Harrach. 104 P.
20. **DOORENBOS J, et KASSAM A. H. 1979.** La réponse des rendements à l'eau. *Irrigation et drainage.* No: 33. FAO-Rome. 193P.
21. **DROOGERS P., KITE G. et MURRAY-RUST H., 2000.** Use of simulation models to evaluate irrigation performance including water productivity, risk and system analyses. *J. Irrig. Sci*, 19, pp:139-145.
22. **DUCHEMIN B., MAISONGRANDE P., BOULET G. ET BENHADJ I., 2008.** A simple algorithm for yield estimates: Evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. *Environmental Modelling & Software*, 23, PP: 876-892

23. **DUCROCQ, M.** 1987. Les bases de l'irrigation. Editions scientifiques universitaires, Mkalles-Mar Roukoz , BP 1514-Beyrouth (Liban).
24. **EDWARD J. RYKIEL, Jr.**, 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *J. Ecological Modelling*. 90. PP: 229-244.
25. **FILALI F.**, 2004. Bilan hydrique à la parcelle : pilotage d'un essai d'irrigation de la culture de blé dur (*triticum durum* desf) variété VITRON par le logiciel « PILOTE dans ses versions 1.2 et 1.3 utilisant respectivement le coefficient cultural et l'indice foliaire ». Thèse magister, Inst. Nat. Agr., El-Harrach. 125P.
26. **GARCIA DE CORTAZAR ATAURI I. et BRISSON N.**, 2007. Comment utiliser STICS sur une nouvelle culture? L'exemple d'adaptation a la vigne (*vitis vinifera* l.). Séminaire STICS, 20-22 mars, Reims, France. PP:3-6.
27. **GATE P.**, 1995. Écophysiologie du blé. Ed Tech doc Lavoisier. 417 P.
28. **HENIN, S.**, 1977: Cours de physique du sol - L'eau et le sol. II. O.e. EDITEST. Paris. 222 p.
29. **I.N.R.A. Adrar (2008) (institut national d la recherche agronomique), Adrar.**
30. **KATERJI, N.**, et **HALLAIRE, M.** 1984. Explicative model of water transfert in the plant and daily evolution of leaf potential. *Les besoins en eau des cultures, Conférence internationale*. Paris, 11/14 Septembre.
31. **KHEPAR S. D., YADAV A. K., SONDHI S. K. et SIAG M.**, 2000. Water balance for paddy fields under intermittent irrigation practices. *J. irrig. Sci.*, 19, PP: 199-208.
32. **KHERBOUCHE Y.**, 2006. Etude de quelque aspects bioécologiques de la sauterelle pèlerine *Schistocercagregaria* Forskal (1775) (Acridae, Cyrtacanthacridinae) dans la région d'Adrar (Sahara, Algérie). Thèse magister, Inst. Nat. Agr., El-Harrach. 97 P.
33. **KRUÈGER E., SCHMID G. et BRUÈCKNERSCHEDULING U.**, 1999. Strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. *Scientia Horticulturae*. 81 PP : 409-424.
34. **KUTSCH C.**, 1978: pouvoir évaporant du climat Marocain. INRA, MAROC, 428p.
35. **LAABOUDI, A.** 2001. Détermination des besoins en eau de la culture du blé dans la zone d'Adrar : Utilisation des cases lysimétriques. Thèse Mag., INA, El-Harrach. 82p.
36. **LAFON et al.**, 1988: Biologie des plantes cultivées, tome 1 édition Tec et Doc Paris p146.
37. **LARRIEU T.**, 2008. Principe du Bilan Hydrique. Bulletin n°1, Chambre d'agriculture 33, Service Agronomie-Environnement. 3P.

38. **LEULMI S.**, 2007. Cinétique et croissance de la culture de blé dur dans la plaine de la Mitidja sous contraintes hydrique : approche par les modèles Pilote et Bilhyna, thèse magister, INA, Elharrach, 199P.
39. **M.A.D.R.**, (2006) (ministère d'agriculture et du développement rural), Algérie.
40. **MADI M.**, 2009. Transfert de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère à l'échelle de la parcelle dans la plaine du haut Chélif (Khemis Miliana). Mémoire mag., centre universitaire de khemis miliana. 123 p.
41. **MAILHOL J.C.**, 2003. Analyse de la Consommation en Eau dans les Différents Contextes d'Agriculture Irriguée. UR Irrigation Cemagref Montpellier. 32 P.
42. **MAILHOL J.C.**, 2005. Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université Montpellier II. 60 P. + annexes.
43. **MAINGUET M.**, 1995. L'homme et la sécheresse. Ed Masson. 335P.
44. **MAKHLOUF, Z.** (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat. Université de Paris XI Orsay / Cemagref (Antony), 228 pp.
45. **MAKHLOUF, Z.** et **MICHEL, C.** (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162, 299-318.
46. **MANCER N.**, 2005. Evaluation d'un essai d'irrigation de complément du blé dur variété SIMETO par le modèle de bilan hydrique « PILOTE » (J.C. Mailhol, Cemagref, Montpellier. Mémoire Ing., Inst. Nat. Agr., El-Harrach. 70 P.
47. **MAREK, T.H., SCHNEIDER, A.D., HOWELL, T.A., et Ebeling, L.L.** (1988). Design and construction of Large Weighing Monolithic Lysimeters. *Transactions of the Asae*, **31**, pp. 477-484.
48. **MILLY, P. C. D.** (1993). "An Analytic Solution of the Stochastic Storage Problem Applicable to Soil Water." *Water Resources Research* 29(11): PP: 375-378.
49. **MITCHELL P. L.**, 1997. Misuse of regression for empirical validation of models. *J. Agricultural system*, 54 (3), PP:313-326.
50. **MOLDEN D.**, 1997. Accounting for water use and productivity. SWIM Paper 1. International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
51. **MOUELHI, S.**, 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 p.

- 52. MOUHOUCHE B., 2000.** L'avenir de l'agriculture saharienne dépend de la maîtrise de la salinisation des sols et de la valorisation de l'eau d'irrigation et de drainage. Symposium blé 2000 ; enjeux et stratégies. 220 P.
- 53. NEMETH I., 2001** devenir de l'azote sous irrigation gravitaire. application au cas d'un périmètre irrigué au Mexique. Thèse de doctorat, université de Montpellier II. 260 P.
- 54. PANIGRAHI B., PANDA S. N. et AGRAWAL A., 2005.** Water Balance Simulation and Economic Analysis for Optimal Size of On-Farm Reservoir. *Water Resources Management*, 19, PP: 233–250.
- 55. PANIGRAHI B., SUDHINDRA A. et PANDA N., 2003.** Field test of a soil water balance simulation model. *Agricultural Water Management* 58. PP223–240.
- 56. PATEL N. et RAJPUT T.B.S., 2008.** Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural water management*. 95, PP: 335 – 349
- 57. PELLIGRINO A. 2003.** Elaboration d'un outil de diagnostic du stress hydrique utilisable sur la vigne en parcelle agricole par couplage d'un modèle de bilan hydrique et d'indicateurs de fonctionnement de la plante. PHD thesis. 138 P..
- 58. PERRIN C., MICHEL C., ANDREASSIAN V. 2007.** Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Cemagref. 16P.
- 59. PINDARD A., 2000.** La relation stress hydrique – rendement du maïs en Bresse : quelle perspective de spatialisation ? Utilisation d'un simulateur de culture (STICS), Mémoire d'Ingénieur d'Agronomie, Etablissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon, France.60 P.
- 60. POST J., HABECK A., HATTERMANN F., KRYSANOVA V., WECHSUNG F. ET SUCKOW F., 2004.** Evaluation of water and nutrient dynamics in soil–crop systems using the eco-hydrological catchment model SWIM : communications de séminaire sur “Modelling water and nutrient dynamics in soil–crop systems” tenus le 14–16 Juin 2004 en Müncheberg, Allemagne. PP 129-146.
- 61. RANA G., et KATERJI N., 2000.** Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy* 13. PP: 125–153.
- 62. RIFAAT, S. 1980.** Comparaison de plusieurs techniques de reconstitution de débits moyens mensuels, Rapport de stage, 66 pp, EPFL (Lausanne), Cemagref (Antony).
- 63. RUGET, F., BRISSON, N., DELECOLLE, R., et FAIVRE, R. (2002).** Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie* 22, 133-158.

64. **SHEIKH V., VISSER S., et STROOSNIJDER L.**, 2008. A simple model to predict soil moisture: Bridging Event and Continuous Hydrological (BEACH) modeling. *Environ. Model. Softw.* (2008), doi:10.1016/j.envsoft.2008.10.005. 15P.
65. **TAHRI M.**, 2008. Mécanisation des céréalicultures sous pivot dans la wilaya d'Adrar : Constat et perspectives. Thèse Ing. Inst. Nati. Agro., EL-Harrach. 73p.
66. **TEARE I.D. et PEET M.M.**, 1983: Crop-Water relations. A Wiley-interscience publication, John Wiley et Sons, New York. tern UsingWater Balance Approach', M.Tech. Thesis, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India.
67. **TUZET A. et PERRIER A.** 1998. Les besoins en eau des cultures : analyse et application, *Traité d'irrigation*. Ed Tech doc Lavoisier, Paris. 944P.
68. **VERNAT Y.**, 2004. Formalisation et qualification de modèles par contraintes en conception préliminaire. Thèse doct., École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Bordeaux, France. 195P et annexes.
69. **WALLACH D., MAKOWSKI D. et JONES J. W.**, 2006. Working with Dynamic Crop models : Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications. 439 P.
70. **WARD R. C.**, 1971. measuring evapotranspiration; a review. *Journal of Hydrology*. 13. PP: 1-21.
71. **YANG, X., PARENT, E., Michel, C. et ROCHE, P.A.**, 1991. Gestion d'un réservoir pour la régularisation des débits. *La Houille Blanche*, (6), 433-440.
72. **ZIZA F.**, 2006. Evolution de la salinité des sols irrigués dans une région saharienne. Thèse magister, Inst Nat Agr, El-Harrach. 113P.

Annexes

Annexe :

Les variables climatiques introduites au modèle (pas du temps journaliers)

année	mois	jour	Tmin (C°)	Tmax (C°)	P (mm)	ETP (mm)	Vv (Km/h)	HR(%)	Rg (MJ/ m²/j)
2007	12	8	5	21,8	0	1,68	12,8	16,8	8
2007	12	9	6	24	0	2,09	9,1	20,9	8,2
2007	12	10	10,7	22,4	0	2,22	30,7	22,2	8
2007	12	11	10	20	0	2,41	26,1	24,1	8
2007	12	12	6,2	19,2	0	3,48	15	34,8	5
2007	12	13	5,5	18,6	0	3,78	19,4	37,8	7
2007	12	14	5,2	19	0	3,92	21,9	39,2	7,3
2007	12	15	4,2	18,5	0	4,91	21,5	49,1	7,3
2007	12	16	4,5	18,4	0	5,45	20,6	54,5	8
2007	12	17	5	19,5	0	5,55	22,8	55,5	8,15
2007	12	18	5	19,5	0	5,76	17,2	57,6	8,5
2007	12	19	3	20	0	6,06	14,4	60,6	8,2
2007	12	20	2,7	20,2	0	6,41	13,9	64,1	8,5
2007	12	21	5,4	22,5	0	6,95	16,1	69,5	8
2007	12	22	6	22,5	0	7,29	20,4	72,9	8,2
2007	12	23	5	19,3	0	7,54	24,8	75,4	8
2007	12	24	3	17,7	0	0,38	17,4	30,8	8
2007	12	25	0,4	17	0	0,83	17,4	8,3	8,15
2007	12	26	2	18,5	0	1,404	20	14,04	8
2007	12	27	6	20	0	1,97	27,6	19,7	8,1
2007	12	28	6	21,1	0	2,37	23,9	23,7	8
2007	12	29	8	19,5	0	2,83	21,9	28,3	8,2
2007	12	30	10,2	20	0	3,16	33,9	31,6	8
2007	12	31	6	20	0	3,54	42,4	35,4	8
2008	1	1	4,3	17	0	4	39,6	55,5	8
2008	1	2	5,3	17,5	0	3,72	30,4	55	8,2
2008	1	3	2	21,5	0	4,32	28,2	51	8
2008	1	4	4,3	20,5	0	4,54	25,6	57,5	8
2008	1	5	9	17	0	4,88	23,2	70	5
2008	1	6	8	18	0	5,47	18,3	70	7
2008	1	7	8,3	18,5	0	5,92	25,6	67	7,3
2008	1	8	7	19,5	0	6,36	24,6	86,5	7,3
2008	1	9	4	19	0	6,62	22	81	8
2008	1	10	5	20	0	7,06	23,9	52,5	8,15
2008	1	11	7	19,5	0	7,52	26,5	75	8,5
2008	1	12	5	20,5	0	7,88	25	71,5	8,2
2008	1	13	4	21,5	0	0,46	24,6	48	8,5
2008	1	14	4,5	21,5	0	0,86	21,9	60,5	8
2008	1	15	5	22	0	1,56	24,6	59,5	8,2
2008	1	16	5	19,5	0	1,83	21,5	57,5	8

2008	1	17	6	22,5	0	2,35	22,6	62,5	8
2008	1	18	7	21,5	0	2,76	33,2	62,5	8,15
2008	1	19	8	27	0	3,04	33,9	59	8
2008	1	20	8	30	0	2,87	23	65	8,1
2008	1	21	6,3	2,5	0	4,45	19,1	62,5	8
2008	1	22	6	21	0	4,98	13,5	65	8,2
2008	1	23	4,2	23,5	0	5,09	19,4	63,5	8
2008	1	24	7	21	0	0,22	29,3	62,5	8
2008	1	25	6	19	0	0,76	26,3	55	8
2008	1	26	6	22	0	1,31	26,1	67	8
2008	1	27	6	21	0	2	9,8	67,5	8
2008	1	28	7,3	21	0	2,22	25,9	67,5	8,3
2008	1	29	7	21,5	0	3,01	21,5	65	8,3
2008	1	30	5,3	21,5	0	3,58	10,2	56,5	8,3
2008	1	31	6,4	21	0	4,04	17,2	55	8
2008	2	1	5,1	22	0	4,56	24,3	55	7
2008	2	2	4,5	22,5	0	5,29	24,6	52,5	8
2008	2	3	4	23	0	5,89	25,7	44,5	8,2
2008	2	4	6,3	24	0	6,32	26,1	43	8,3
2008	2	5	8	24,5	0	0,78	20,6	35,5	8,3
2008	2	6	9	26	0	1,22	14,6	34,5	8,1
2008	2	7	9,2	26	0	2,01	16,1	45	8,3
2008	2	8	8	24	0	2,94	11,3	46	8
2008	2	9	4	24	0	2,06	8,1	47,5	8,3
2008	2	10	7,3	23,5	0	4,44	11,9	44	8,3
2008	2	11	7	22	0	4,86	13,1	46	3,2
2008	2	12	7,4	18	0	5,48	13,1	44	9
2008	2	13	13,2	21,5	0	0,48	6,5	77,5	0
2008	2	14	14,2	28,5	0	0,98	6,9	60,5	8
2008	2	15	11,2	29,5	0	0,98	7,2	57,5	8
2008	2	16	11,4	22,5	0	1,58	11,3	55	8
2008	2	17	11,4	25	0	1,81	19,1	55	8,3
2008	2	18	16,1	22,5	0	2,87	18	53,5	8
2008	2	19	10	23,5	0	3,52	28,7	45	8
2008	2	20	10	27	0	4,54	20,6	42,5	8
2008	2	21	12,2	19,5	0	1,21	37	37,5	8,3
2008	2	22	13	29	0	1,23	23,3	41,5	7
2008	2	23	15,2	27,5	0	1,49	16,5	38	5,2
2008	2	24	16,4	28,5	0	2,76	15,2	50,5	0
2008	2	25	14,1	29,5	0	3,58	22	53	6,4
2008	2	26	15	30,5	0	4,28	17,8	44	7
2008	2	27	17,2	27	0	5,18	17,4	45,5	1,1
2008	2	28	5,2	28	0	0,39	22,8	46,5	0
2008	2	29	12	27	0	2,35	22,6	36	8
2008	3	1	8,5	27,5	0	3,47	22,2	35	7

2008	3	2	14	24,5	0	4,3	19,8	23,55	7,2
2008	3	3	15	25,5	0	5,07	16,7	27	7,3
2008	3	4	14	27,5	0	5,87	21,3	26	8
2008	3	5	10,2	27,5	0	6,46	22,4	30,5	8
2008	3	6	9,2	29	0	7,32	20	37	8,5
2008	3	7	5,4	23,5	0	0,71	17,2	34,5	8
2008	3	8	8,2	25	0	1,37	37,8	29	9
2008	3	9	11,3	26,6	0	2,06	41,7	33	9,5
2008	3	10	10,5	28,5	0	2,76	25,2	40	9,3
2008	3	11	13,3	31	0	3,3	20,4	35	9,2
2008	3	12	15,6	31,5	0	4,11	16,9	28,5	8,3
2008	3	13	11	33,5	0	1,17	23	28,5	8,4
2008	3	14	15,2	25	0	1,16	31,1	35	7,45
2008	3	15	20	37,5	0	1,82	26,3	57,5	8,2
2008	3	16	21,3	32,5	0	2,8	20,6	47,5	8,3
2008	3	17	17,2	32,5	0	3,38	33,5	35	9,5
2008	3	18	16,2	36	0	5,06	28	40	8,2
2008	3	19	18	38	0	5,84	14,6	29	5,3
2008	3	20	21,2	33	0	6,88	28,9	32,5	8,2
2008	3	21	12	30	1,02	0,92	26,9	32,5	53
2008	3	22	11,5	24	0	1,92	36,5	35	6,1
2008	3	23	10,4	29,5	0	2,5	18,7	37,5	9
2008	3	24	13,3	30,5	0	3,52	18	57	8,5
2008	3	25	13,1	29,5	0	4,71	27	53	8,3
2008	3	26	15,3	31	0	5,58	25,2	39	9
2008	3	27	14,2	30	0	6,34	25,7	47,5	9,3
2008	3	28	11,2	32	0	0,99	19,4	45	9,4
2008	3	29	19,5	32,5	0	1,9	30,4	36,5	8,3
2008	3	30	18	33,5	0	2,95	30,6	33,5	7,1
2008	3	31	15,5	29	0	3,62	22,2	28	11,1
2008	4	1	13,4	26,5	0	4,41	14,8	24,5	8,3
2008	4	2	12,2	24	0	4,34	27,4	22,5	8,3
2008	4	3	13,2	25	0	6,66	8,9	23	10
2008	4	4	7,2	28	0	1,04	17,6	22	10
2008	4	5	10,8	30,5	0	2,36	35,4	35	10
2008	4	6	15	35	0	3,05	22	36,5	10
2008	4	7	16,2	37,5	0	3,15	12,6	30	10
2008	4	8	18,4	38,5	0	4,97	11,1	32,5	8,3
2008	4	9	21	39,5	0	1,34	12,4	31	9,5
2008	4	10	19,5	39	0	2,4	30,4	29,5	10
2008	4	11	19,3	37,1	0	3,52	15,7	27	10
2008	4	12	15,2	34	0	4,71	25,7	27	10
2008	4	13	13,4	30	0	5,41	23	25	10
2008	4	14	15,3	30,5	0	6,87	18,9	28,5	10
2008	4	15	18	32	0	1,62	19,1	30	10

2008	4	16	21	31	0	2,92	19,4	30	10
2008	4	17	18,2	36	0	4,06	28	30	10
2008	4	18	19,5	39	0	1,51	31,5	30	10
2008	4	19	17,1	36	0	2,34	16,5	29,5	10
2008	4	20	16,3	35,5	0	3,51	16,3	27	10
2008	4	21	16	33	0	4,66	31,7	24	10
2008	4	22	18	33,5	0	1,02	25,6	27,5	10
2008	4	23	18,3	33	0	2,44	13,1	30	10
2008	4	24	18	34,5	0	3,76	21,5	15,575	11,3
2008	4	25	16,4	34	0	5,16	23,9	0	10,4
2008	4	26	18,3	30,5	0	6,14	14,3	31,15	11,5
2008	4	27	17,5	35	0	8,5	30,6	32	11,5
2008	4	28	18,1	37,5	0	2,1	34,1	31	11
2008	4	29	23,2	38	0	3,72	26,9	32,5	3,5
2008	4	30	26,3	39	0	4,98	22	29,5	3,3
2008	5	1	29	40	0	6,08	28,7	31,5	4,3
2008	5	2	24,1	42	0	1,28	33,9	31	4,3
2008	5	3	22,3	41,5	0	2,35	27,2	24	9,3
2008	5	4	25,3	41,5	0	3,44	30,9	22,5	6,2
2008	5	5	24,2	41,5	0	4,79	32	29	10,3
2008	5	6	27,2	43	0	5,21	31,1	35,5	10
2008	5	7	30	42,5	0	6,62	30,7	38	7
2008	5	8	23,2	39	0	8,02	27	40	10,5
2008	5	9	23,2	35	0	1,51	32,4	35,5	6,8
2008	5	10	21	37,5	0	3,05	24,8	33	10
2008	5	11	13,2	35	0	4,2	24,8	28	8,2
2008	5	12	18,4	35	0	5,01	32,4	27,5	9,2
2008	5	13	20,4	34,5	0	6,15	26,9	37,5	12
2008	5	14	20	36	0	7,54	24,1	38	4,15
2008	5	15	23,2	39,5	0	1,56	25,9	39	11,3
2008	5	16	19,3	37	0	2,11	20,4	36	11,38
2008	5	17	19	34	0	3,51	24,1	31	10,3
2008	5	18	21	32,5	0	5,05	22,8	25	11,3
2008	5	19	19	33,5	0	6,25	15,6	25	11,55
2008	5	20	21,2	37,5	0	1,36	15,4	25,5	12
2008	5	21	22	39	0	2,58	14,6	25	11
2008	5	22	21,1	39,5	0	2,48	15,6	32,5	11
2008	5	23	20	40,5	0	4,55	14,1	37,5	12
2008	5	24	22	40,5	0	5,51	17	35	11,4
2008	5	25	21,2	41,5	0	7,2	15,4	35	12
2008	5	26	23,3	36	0	8,14	13,3	32,5	9
2008	5	27	20	34	0	1,5	16,7	31	8
2008	5	28	19	33	0	2,72	17	28,5	9,5
2008	5	29	20,2	36	0	4,85	21,9	31	11
2008	5	30	21,1	39	0	5,21	25,7	30	10,2

2008	5	31	20,2	32	0	6,21	29,1	25	10
2008	6	1	22	39	0	7,5	17,6	16	12
2008	6	2	20	39	0	8,82	16,9	34,5	11,25
2008	6	3	24,2	40	0	1,02	29,1	31,5	11,3
2008	6	4	25,4	42,5	0	2,58	26,9	35,5	6,1
2008	6	5	21	43	0	3,01	38,9	36,5	8
2008	6	6	21	43,5	0	4,78	27,2	33	11
2008	6	7	21,3	42,5	0	6,01	23,3	33,5	12
2008	6	8	21,3	42	0	7,43	18,9	32,5	12
2008	6	9	23,3	39	0	0,78	20,2	32,5	11
2008	6	10	24,4	42,5	0	2,04	13,1	33,5	10,3
2008	6	11	21,2	43	0	3,21	10,2	32,5	11,5
2008	6	12	24,1	43	0	4,34	18,7	32	11,4
2008	6	13	24,1	43,5	0	5,63	24,4	29	11
2008	6	14	21,3	43	0	1,43	16,9	28	12,3
2008	6	15	24,4	44,5	0	3,07	16,5	29	12,2
2008	6	16	28,1	46,5	0	4,28	6,7	47,5	11,5
2008	6	17	28,1	46,5	0	5,69	13	24	10
2008	6	18	28,2	46,5	0	1,24	17,8	32	6,3
2008	6	19	31,4	47	0	2,44	19,3	29	8
2008	6	20	30,1	47	0	4,04	12,6	32	8,3
2008	6	21	31	48	0	6,01	13,3	33	7,11
2008	6	22	31,1	45,5	0	1,5	15	32,5	11,3
2008	6	23	29,3	44	0	3,66	16,5	30	12
2008	6	24	26	43	0	5,41	22,6	27,5	12
2008	6	25	27	44,5	0	7,5	24,1	29,5	12
2008	6	26	28	45	0	1,96	17,8	27	11,3
2008	6	27	28,2	46	0	4	4,8	31,5	10,3
2008	6	28	33,2	45,5	0	5,11	13,5	29	10
2008	6	29	28,3	43,5	0	5,32	19,1	29	12
2008	6	30	28	42	0	8,62	19,1	26	12

ملخص

الهدف الأساسي من هذا العمل هو محاكاة مكونات الحصيلة المائية باستعمال نموذج ذي خزانات (STICS) قصد تقييمه تحسينا لتسيير الموارد المائية في المجال الفلاحي، المكونات الممتلئة هي: التبخر النتحي الأقصى، مخزون الرطوبة وكميتي مياه السقي والصرف، بالموازاة مع ذلك، قمنا بمتابعة تغيرات محتوى الرطوبة والضغط في التربة بالإضافة إلى حساب احتياجات النبات للماء باستعمال ليزيمتر (على المدى اليومي)، قمنا كذلك بمقارنة النتائج المحصل عليها من النموذج والمتابعة الميدانية حيث بين النموذج عدم نجاعته، أما متابعة الضغط فلم تعطي نتائج جيدة عكس الليزيمتر، وفي الأخير، قمنا بتقييم إحصائي لنتائج النمذجة.

الكلمات المفتاح: نموذج ذو خزانات، الحصيلة المائية، تقييم، الرطوبة في التربة، الضغط، STICS، أدرار.

Résumé:

L'objectif principal de ce travail consiste à simuler les différents paramètres du bilan hydrique en utilisant un modèle à réservoirs (STICS) pour évaluer ce dernier, afin d'améliorer la gestion des ressources en eau en agriculture, les paramètres simulés sont : l'évapotranspiration maximale, réserve en eau, l'irrigation et le drainage.

En plus, nous avons menés un travail sur terrain pour mesurer quotidiennement : l'humidité et la tension dans le sol par des tensiomètres et l'ETM par un lysimètre.

Nous avons obtenus des résultats non satisfaisants après la confrontation entre les résultats mesurés et simulés parce que le modèle ne prend pas en considération les conditions climatiques sévères de la région. Le lysimètre montre une grande efficacité par contre aux tensiomètres.

En fin, nous avons réalisé une évaluation statistique du modèle.

Mots clés: Modèle à réservoirs, bilan hydrique, évaluation, humidité, tension, STICS, Adrar.

Abstract:

The principal objective of this work is to simulate the different parameters of the water balance by using models with reservoir (STICS) to evaluate this last, in order to improve the management of water in agriculture, the simulated parameters are: maximal evapotranspiration (ETM), stock of water, the irrigation and the drainage. Moreover, we undertook a work to measure daily moisture, the tension in the soil by a tensiometer and the ETM by a lysimeter.

We have obtained unacceptable results after confrontation between the results measured and simulated because the model does not take into account the severe climatic conditions of the region.

The lysimeter has good results comparatively to the tensiometer.

In the end, we have realized a statistical evaluation of the model.

Keywords: Models with reservoir, water balance, evaluation, moisture, tension, STICS, Adrar.