

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

INSTITUT NATONAL AGRONOMIQUE EL – HARRACH ALGER

المعهد القومي للعلوم الفلاحية – الحراش – الجزائر



THESE



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

Département : Génie Rural

Spécialité : Hydraulique Agricole

Thème

**Cinétique hydrique et croissance de la culture de blé dur
dans la plaine de la Mitidja sous contrainte hydrique :
Approches par les modèles Pilote et Bilhyna**



Présentée par :
LEULMI Sonia



Jury :

Président :	M. AÏDAOUI Abdellah	Professeur, INA Alger
Directeur de thèse :	M. SELLAM Fouad	Chargé de Cours, INA Alger
Examineurs :	Mme. MEKliche Leila	Professeur, INA Alger
	M. HARTANI Tarek	Maître de conférence à l'INA.
	M. MOUHOUCHE Brahim	Maître de conférence à l'INA.

Année universitaire : 2006 – 2007

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir accordé la patience, la santé et le courage d'accomplir ce travail.

Tous mes reconnaissances et mes remerciements iront à mon directeur de thèse **M. SELLAM Fouad** pour l'intérêt qu'il a accordé à mon travail et ses nombreux conseils qui m'ont beaucoup aidé ainsi que sa présence, sa disponibilité et ses orientations qui n'ont jamais cessé.

Je tiens également à remercier vivement **M. AIDAOUI Abdellah** pour ces conseils et sa précieuse aide ainsi que pour l'honneur de présider ce jury.

Mes remerciements vont également à tous les membres du Jury pour avoir pris de leur temps afin de lire et juger mon travail :

- **Mme. MEKLICHE Leila**
- **M. HARTANI Tarik**
- **M. MOUHOUCHE Brahim**

Je ne saurai oublier de remercier chaleureusement **M. Jean Claude MAILHOL** du Cemagref de Montpellier et **M. Alain PERRIER** de l'INA Paris - Grignon pour avoir mis à notre disposition les modèles « **PILOTE** » et « **BILHYNA** » ainsi que pour leurs précieuses explications concernant leur utilisation.

Je tiens à souligner mon extrême gratitude à l'égard de tous mes enseignants en particulier ceux du département du « **Génie Rural** » qui ont contribué tous à ma formation.
Mes sincères remerciements à l'ensemble du personnel du département et de la Station Expérimentale de l'INA.



Sonia LEULMI

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents à qui je dois énormément.
Ma sœur Imène et Mes frères : Mohamed Tarek et Mehdi ; que Dieu me les garde.

Ma très chère Grand-Mère que Dieu nous la garde.

Toute ma famille **Maternels et Paternels** sans exception.

Sans oublier tous mes amis et mes collègues de l'INA.



Liste des figures

N°	Titre	Page
1	Représentation schématique de la circulation de l'eau dans le SPAC.	4
2	Eau contenue dans le sol selon sa texture.	6
3	Place de l'eau du sol dans le cycle de l'eau.	7
4	Disponibilité de l'eau d'une couche de sol pour les plantes.	8
5	Rapport entre la texture et l'eau du sol.	9
6	L'état de l'eau dans le sol.	11
7	Tension de succion selon la texture du sol.	12
8	La quantité d'eau prélevée par les plantes influencée par la distribution des racines dans le sol.	18
9	Evolution du potentiel de l'eau dans le « SPAC » et analogie avec un circuit électrique formé de résistances fixes et de résistances variables.	25
10	Schéma du bilan hydrique d'une zone racinaire.	29
11	Schéma de modélisation du ruissellement en deux phases.	40
12	Schéma simplifié de la captation sur une culture.	41
13	organigramme simplifié du couplage de l'ensemble des modèles au sein de BILHYNA.	45
14	Schéma simplifié du fonctionnement du modèle de Mulch.	46
15	Schéma de pondération de la transpiration potentielle de la végétation (ET_{veg}) en fonction de l'humidité du sol.	48
16	Principe de fonctionnement du modèle Pilote.	52
17	Schéma de fonctionnement du modèle Pilote.	53
18	Simulation du LAI sur le traitement sec (<i>Saïda, Tunisie, 1999</i>).	61
19	Evolution de la réserve en eau du sol sur le traitement T2 (<i>Saïda, Tunisie, 1999</i>).	62
20	Schéma représentant les différentes quantités d'eau Entrant et Sortant dans la zone racinaire.	64
21	Relation « pF – Humidité du sol » .	75
22	Diagramme ombrothermique (<i>Région EL HARRACH, période de 1952 – 2004</i>).	82
23	Température de l'air moyenne mensuelle (<i>Station ONM Dar El Beida - Période 1952 - 2004</i>).	83
24	Humidité de l'air moyenne mensuelle (<i>Station ONM Dar El Beida - Période 1952 - 2004</i>).	84
25	Vitesse du vent moyenne mensuelle (<i>Station ONM Dar El Beida - Période 1952 - 2004</i>).	85
26	Durée d'insolation moyenne mensuelle (<i>Station ONM Dar El Beida - Période 1952 - 2004</i>).	86
27	Précipitation mensuelle (<i>Station ONM Dar El Beida : Période 1952 - 2004</i>).	87
28	Evapotranspiration Penman mensuelle (<i>Station ONM – Dar El Baida, Période 1952 – 2004</i>).	89
29	Déficits « P – ETo » mensuel (<i>Station ONM – Dar El Baida, Période 1952 – 2004</i>).	90
30	Rayonnement global moyen mensuel (<i>Station ONM Dar El Beida : Période 1952 - 2004</i>).	91
31	Carte des sols de l'INA.	93
32	Parcelle expérimentale de l'INA.	93

33	Système d'irrigation par aspersion.	106
34	Faussé réalisé pour le suivi de l'évolution de la profondeur racinaire (<i>Essai 2004</i>).	111
35	Evolution de la profondeur racinaire (<i>Traitements Irrigués 2000, 2001 et 2002</i>).	112
36	Evolution de la profondeur racinaire (<i>Traitements Pluviaux 2000, 2001, 2002 et 2004</i>).	112
37	Température moyenne mensuelle (<i>Station ONM Dar El Beida - Période 1953 - 2005</i>).	118
38	Humidité moyenne mensuelle (<i>Station ONM Dar El Beida - Période 1953 - 2005</i>).	119
39	Vitesse du vent moyenne mensuelle (<i>Station ONM Dar El Beida - Période 1953 - 2005</i>).	120
40	Durée d'insolation moyenne mensuelle (<i>Station ONM Dar El Beida - Période 1953 - 2005</i>).	121
41	Précipitations mensuelles des campagnes expérimentales.	122
42	Précipitations cumulées des campagnes expérimentales.	123
43	Evapotranspirations potentielles des campagnes expérimentales.	124
44	Evapotranspirations potentielles cumulées des campagnes expérimentales.	125
45	Déficit pluviométrique des campagnes expérimentales.	126
46	Déficit pluviométrique cumules des campagnes expérimentales.	127
47	Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2000</i>).	128
48	Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2001</i>).	129
49	Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2002</i>).	129
50	Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2003</i>).	130
51	Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2004</i>).	130
52	Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2005</i>).	131
53	Evolution de la réserve en du sol Simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2000</i>).	132
54	Evolution de la réserve en du sol simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2001</i>).	133
55	Evolution de la réserve en du sol simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2002</i>).	133
56	Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement MOD, Essai 2000</i>).	134
57	Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement MOD, Essai 2001</i>).	135
58	Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement MOD, Essai 2002</i>).	135

59	Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement SEV, Essai 2000</i>).	137
60	Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement SEV, Essai 2001</i>).	137
61	Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement SEV, Essai 2002</i>).	138
62	Relation entre les réserves en eau du sol simulées par Pilote et Bilhyna.	140
63	Relation entre réserves en eau du sol mesurées et simulées par Bilhyna et Pilote.	140
64	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2000</i>).	142
65	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2001</i>).	143
66	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2002</i>).	143
67	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2003</i>).	144
68	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2004</i>).	144
69	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2005</i>).	145
70	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2000</i>).	146
71	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2001</i>).	147
72	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2002</i>).	147
73	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement MOD, Essai 2000</i>).	148
74	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement MOD, Essai 2001</i>).	148
75	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement MOD, Essai 2002</i>).	149
76	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement SEV, Essai 2000</i>).	150
77	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement SEV, Essai 2001</i>).	151
78	Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement SEV, Essai 2002</i>).	151
79	Relation entre les indices foliaires « LAI » simulés par Pilote et Bilhyna.	153
80	Relation entre les indices foliaires « LAI » mesurés et simulés par Bilhyna et Pilote.	154
81	Evolution de l'évapotranspiration Potentielle Simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Période d'essai 2000 - 2005</i>).	157

82	Relation entre les évapotranspirations potentielles simulées par Pilote et Bilhyna.	158
83	Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2000</i>).	159
84	Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2001</i>).	159
85	Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2002</i>).	160
86	Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2000</i>).	161
87	Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2001</i>).	161
88	Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2002</i>).	162
89	Evolution des évapotranspirations réelles cumulées (<i>Traitement PLU, Essai 2000</i>).	163
90	Evolution des évapotranspirations réelles cumulées (<i>Traitement PLU, Essai 2001</i>).	163
91	Evolution des évapotranspirations réelles cumulées (<i>Traitement PLU, Essai 2002</i>).	164
92	Evolution des évapotranspirations réelles cumulées (<i>Traitement ETM, Essai 2000</i>).	165
93	Evolution des évapotranspirations réelles cumulées (<i>Traitement ETM, Essai 2001</i>).	165
94	Evolution des évapotranspirations réelles cumulées (<i>Traitement ETM, Essai 2002</i>).	166
95	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (<i>Traitement PLU, Essai 2000</i>).	167
96	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2000</i>).	168
97	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (<i>Traitement PLU, Essai 2001</i>).	170
98	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2001</i>).	170
99	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (<i>Traitement PLU, Essai 2002</i>).	171
100	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (<i>Traitement PLU, Essai 2002</i>).	172
101	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (<i>Traitement ETM, Essai 2000</i>).	173
102	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2000</i>).	173
103	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (<i>Traitement ETM, Essai 2001</i>).	175
104	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2001</i>).	175
105	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (<i>Traitement ETM, Essai 2002</i>).	176

106	Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (<i>Traitement ETM, Essai 2002</i>).	177
107	Simulation des irrigations (<i>Essai 2000</i>).	179
108	Simulation des irrigations (<i>Essai 2001</i>).	181
109	Simulation des irrigations (<i>Essai 2002</i>).	183
110	Simulation des irrigations (<i>Essai 2000</i>).	184
111	Simulation des irrigations (<i>Essai 2001</i>).	185
112	Simulation des irrigations (<i>Essai 2002</i>).	186
113	Evolution comparée des épaisseurs du Mulch et de la couche superficielle du sol (<i>Traitements Pluviaux, Période de 2000 à 2002</i>).	188
114	Effet du Mulch sur l'évaporation du sol (<i>Traitements Pluviaux, de 2000 à 2002</i>).	189
115	Rendement en grains (T/ha) mesuré et simulé.	190

Liste des Tableaux

N°	Titre	Page
1	Période critiques de quelques Cultures.	20
2	Evolution des coefficients cultureux « Kc » pendant le cycle du blé.	23

3	Les différentes profondeurs racinaires et taux de tarissement de l'eau du sol.	66
4	Les ordres de grandeurs de la « RU » pour les différents types de sol.	67
5	Les différents « Kc » pour les différentes cultures.	70
6	Outils de contrôle de l'état hydrique de la plante.	80
7	Valeurs des températures moyennes, minimales et maximales mensuelles.	84
8	Valeurs des humidités de l'air moyennes mensuelles (%).	85
9	Valeurs de la vitesse du vent moyennes mensuelles (m/s).	86
10	Valeurs de la durée d'insolation moyennes mensuelles (h).	87
11	Valeurs moyennes, maximales et minimales des précipitations mensuelles.	88
12	Valeurs des ETo minimales, maximales et moyennes (mm).	89
13	Valeurs des « P – ETo » minimales, maximales et moyennes (mm).	91
14	Valeurs moyennes mensuelles du Rayonnement global.	92
15	Caractéristiques physiques et pédologiques de chaque type de sol.	94
16	Densité apparente (Sol 4).	95
17	Paramètres d'entrée liés au sol.	95
18	Profil hydrique initial (Bilhyna).	96
19	Caractéristiques des deux variétés de blé dur « Vitron » et « Simeto » .	98
20	Évolution des coefficients culturaux « Kc » pendant le cycle végétatif du blé.	99
21	Les différentes opérations culturales avant semis.	100
22	Les différentes dates de semis, doses de semis et de récolte.	102
23	Les différents traitements phytosanitaires effectués durant les campagnes de 2000 à 2005.	102
24	Paramètres d'entrée liés à la plante.	103
25	Superficies (m ²)des parcelles expérimentales.	104
26	dates et doses (mm) d'irrigation des trois (03) essais.	104
27	Les différents stades phénologiques.	109
28	Valeur maximale de la profondeur racinaire.	113
29	Les différents résultats de mesure du LAI.	115
30	Rendements mesurés (T/ha) durant les campagnes expérimentales.	116
31	Valeurs extrêmes des températures moyennes mensuelles (°C).	118
32	Valeurs extrêmes des humidités de l'air (%)moyennes mensuelles.	119
33	Valeurs extrêmes de la vitesse du vent (m/s) moyennes mensuelles.	120
34	Valeurs extrêmes de la durée d'insolation (h) moyennes mensuelles.	121
35	Valeurs cumulées totales des précipitations (mm).	124
36	Valeurs cumulées totales des ETo (mm).	125
37	Tableau Comparatif des « LAI _{max} » obtenus.	155
38	Comparaison des « ETR » cumulées Pilote – Bilhyna (<i>Traitements Pluviaux</i>).	164
39	Comparaison de « ETR » cumulées Pilote – Bilhyna (<i>Traitements Irrigués</i>).	166
40	Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote (<i>Traitement pluvial 2000</i>).	169
41	Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote (<i>Traitement pluvial 2001</i>).	171
42	Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote(<i>Traitement pluvial 2002</i>).	172
43	Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote (<i>Traitement Irrigué 2000</i>).	174
44	Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote(<i>Traitement Irrigué 2001</i>).	176

45	Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote (<i>Traitement Irrigué 2002</i>).	177
46	Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Essai 2000</i>).	180
47	Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Essai 2001</i>).	182
48	Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Essai 2002</i>).	183
49	Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Essai 2000</i>).	185
50	Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Essai 2001</i>).	186
51	Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (<i>Essai 2002</i>).	187

Liste des abréviations

θ : Teneur en eau (mm/m).

θ_{ini} : Stock initial.

ΔS : Variation du stock en eau.

CC, FC : Capacité au champ.

D : Drainage.
da : Densité apparente du sol (g/cm^3).
DUL : Drained Upper Limit
R : Ruissellement.
Esol : Evaporation du sol.
ETM : Evapotranspiration maximale.
ETP : Evapotranspiration potentielle.
ET₀ : Evapotranspiration de référence.
ETR : Evapotranspiration réelle.
ET : Evapotranspiration.
Fc : Flux capillaire.
SPAC : Sol – Plante – Atmosphère – Continuum.
EUE : Efficacité d'utilisation de l'eau.
H : Humidité de l'air (%).
 ψ_s : Potentiel ou tension
I : Irrigation.
Ins : Insolation (heures).
HI_{opt} : Indice de récolte optimal.
HI : Indice de récolte.
H_A : Humidité en équilibre avec l'air.
H_c , **H_{cc}** : Humidité à capacité au champs.
H_{min} : Humidité minimum (Point de flétrissement).
H_{max} : Humidité maximum.
H_{sat} : Humidité à saturation.
JAS : Jours après semis.
K_{cmax} : Coefficient cultural maximale.
K_c : Coefficient cultural.
K_{smax} : Coefficient cultural du sol nu maximale.
K_{snu} : Coefficient cultural du sol nu.
K : Coefficient d'extinction .
K(h) : Conductivité hydraulique.
Cw : Capacité capillaire.
LAI_{opt} : Indice de surface foliaire optimale.

LAI_{moy.} : Indice de surface foliaire moyen (calculé en période critique).

LAI : Indice de surface foliaire (leaf area index).

P : Précipitation.

PFP : Point de flétrissement permanent.

Pj : Précipitation journalière.

Plu : Pluvial.

Prj : Profondeur racinaire journalière.

Ps : Profondeur du réservoir superficiel.

Px : Profondeur racinaire maximale.

Rc ou Rem : Remontée capillaire.

Rdt : Rendement.

RDU, SDU : Réserve difficilement utilisable

RFU, Srfu : Réserve facilement utilisable.

Rg : Rayonnement global (J/M²).

Rini : Réserve initiale du sol.

Rpfp, Spfp : Stock au point de flétrissement permanent.

Rcc, Scc, Sfc : Stock à la capacité au champ.

RU, PAWC : Réserve utile.

RUE : Efficacité d'utilisation du rayonnement (g/MJ⁻¹).

Sj : Stock journalier (mm).

S_{mes}, S_{obs.} : Stock mesuré (mm).

S_{sim} : Stock simulé (mm).

S(j) : Rayonnement solaire incident (J/m²)

IE : Irrigation essai (mm).

IS : Irrigation simulée (mm).

t : Temps (s)

T : Température de l'air (°C).

T_b : Température de base.

T_m : Somme de température pour obtenir le LAI max.

T_{mat} : Cumul des température du semis jusqu'à la récolte.

T_{max} : Température maximale de l'air (°C).

T_{min} : Température minimale de l'air (°C).

T_{moy} : Température moyenne de l'air (°C).

T_p : Transpiration.
T_{pm} : Transpiration maximale.
TT : Indice thermique.
t_{s1} : Somme de température depuis la levée jusqu'au début de la période de sensibilité marquée au stress hydrique.
t_{s2} : Somme de température depuis la levée jusqu'à la fin de la période de sensibilité marquée au stress hydrique.
V_r : Croissance racinaire en mètre par jour.
V_v : vitesse du vent (m/s).
Y_a : Rendement en conditions non limitantes en eau
Y_m : Rendement final.
I (j) : Fraction de la radiation solaire interceptée.
ZRE : Zone racinaire effective.
TAW : Eau disponible totale dans la zone racinaire. (Total Available Water)
TxT : Taux de Tarrissement.
PR : Point de Remplissage.
W : Quantité totale d'eau nette apportée.
Q : Débit (m³ / s)
Zrj : Profondeur racinaire correspondante au jour « j ».
Tw_t : Eau totale dans la zone racinaire u temps (t).
Tw_(t-1) : Eau totale dans la zone racinaire au temps (t-1)
CE : Conductivité électrique.
LS : Limon – Sableuse.
L : Limoneuse.

Résumé

Les six (06) campagnes expérimentales successives faisant l'objet de l'étude présentée dans cette thèse ont été conduites en plein champs durant la période de 2000 à 2005 à la station expérimentale de l'Institut National Agronomique d'El Harrach. Les essais ont été réalisés sur la culture de blé dur variétés « Simeto » pour les campagnes 2004 et 2005, et « Vitron » pour la période d'essai de 2000 à 2003. Quatre traitements « Pluvial, Irrigué, Modéré et Sévère » ont été appliqués pour les protocoles expérimentaux de 2000 à 2002, les essais 2003,

2004 et 2005 ont fait l'objet uniquement de traitements « Pluviaux ». L'étude a porté, essentiellement, sur la cinétique hydrique du sol et la croissance de la culture de blé dur sous contrainte hydrique à travers une « paramétrisation » des deux modèles « Bilhyna » et « Pilote » qui représentent deux modèles de simulation du bilan hydrique et de la croissance végétale. Cette « paramétrisation » a permis de déterminer les caractéristiques expérimentales liées au sol et à la plante, constituant des données d'entrée essentielles aux modèles. Le calage des deux modèles a essentiellement porté sur des confrontations entre réserves en eau et indices foliaires mesurés et simulés.

Mots clés : Cinétique hydrique, contrainte hydrique, calage, paramétrisation, irrigation, Indice de surface foliaire, blé dur, modèle.

Abstract

Six (06) successive experimental campaigns being the subject of the study presented in this thesis were conducted from 2000 to 2005 at the experimental station of the Agronomic National Institute of El Harrach. The tests were carried out on the durum wheat culture varieties "Simeto" for the years 2004 and 2005, and "Vitron" for period of 2000 to 2003. Four treatments "Rain, Irrigated, Moderated and Severe" were applied for the experimental protocols of 2000 to 2002, the tests 2003, 2004 and 2005 were managed by only "Rain" treatments. The study carried, primarily, on the hydrous kinetics of the ground storage and the growth of the durum wheat culture under hydrous constraint through a "parameterization" of the two models "Bilhyna" and "Pilote" which are usually used to simulate soil water budget and crop growth. This "parameterization" permitted to determine the characteristics related to ground and crop, constituting essential data inputs of the two models. The calibration of the two models were essentially realized by confrontations between measured and simulated soil water storage and leaf area index

Key words : water budget, drought stress, calibration, irrigation, durum wheat, computer model, parameterization, leaf area index.

الملخص

هذه الاطروحة تتضمن حملات تجريبية متتالية أنجزت خلال السنة سنوات الماضية (من 2000 إلى 2005) على مستوى المعهد الوطني للعلوم الفلاحية بالحرش . أ جريت هذه التجارب على صنفين من نبات القمح الصلب : صنف "Simeto" (2004 و 2005) و صنف "Vitron" (من 2000 إلى 2003) ، و تضمنت عموماً أربعة أنظمة السقي:

- نظام ري بالا مطار فقط .
- نظام سقي كثيف .
- نظامين بطريقة السقي المتوسط .

أهداف هذه التجارب تتضمن دراسة الحركية المائية في التربة و نمو النبات ، و مدى تأثرها بالنقص المائي .
إستعمل في هذا المجال نموذجين رقم " *Pilote* " " *Bilhyna* " بهدف تنسيير الحوصلة الحوصلة لمائية في التربة و نمو النبات .
من أجل تثبيت إستعمال هذين النموذجيين، قمنا بتعبير المقاييس الأولى المطلوبة لإدارتها ، و ذلك بمقارنت لنتائج التجريبية مع النتائج المحصل عليها عن طريق النموذجين .

كلمات المفتاح : حر كية الماء ، النقص المائي ، الحوصلة المائية ، التعبير ، تنسيير الري ، القمح الصلب ، النموذج .

Sommaire

SOMMAIRE

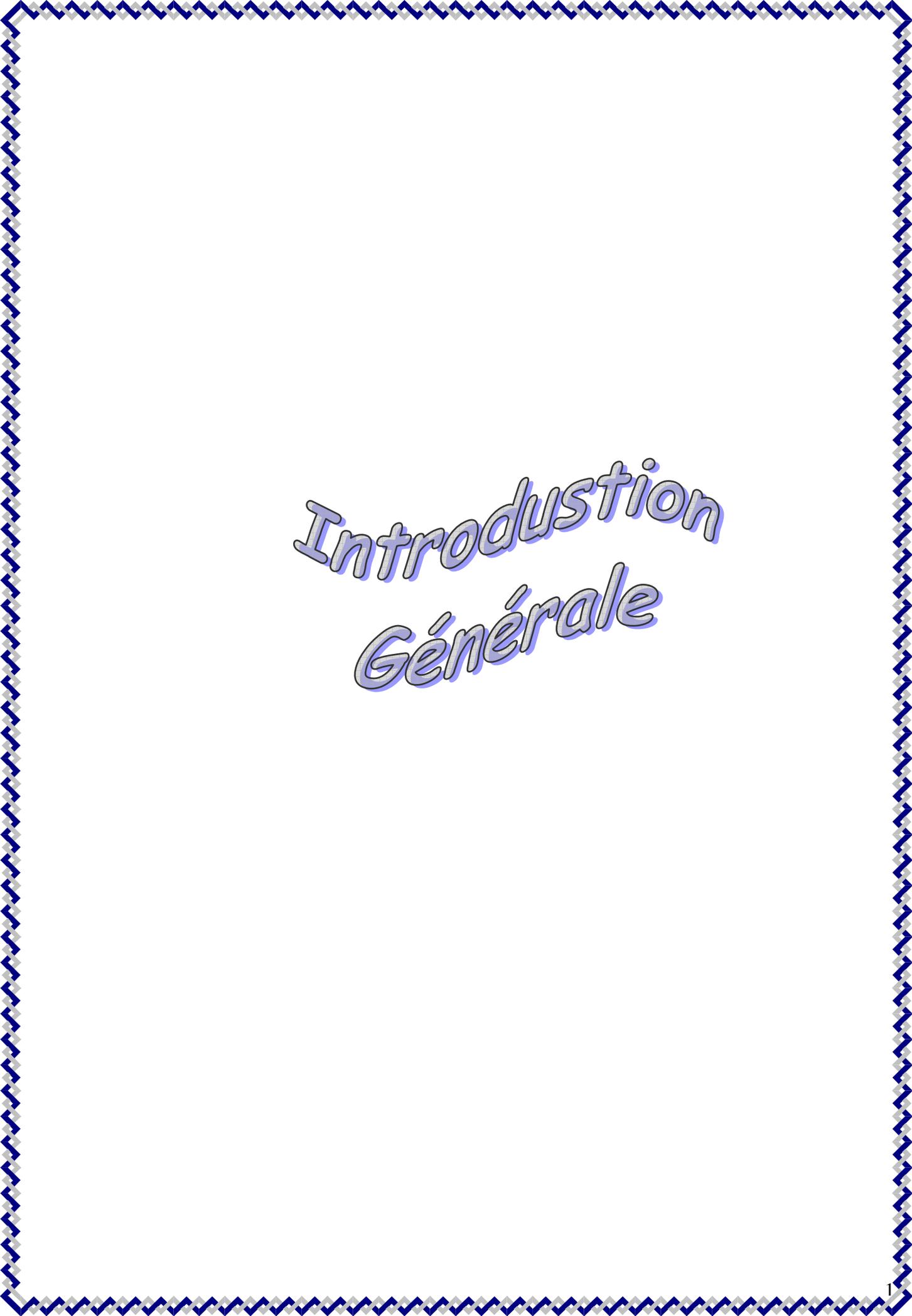
Titre	Pag
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Partie Bibliographique	
Chapitre 1. « Circulation de l'eau dans le système Sol – Plante – Atmosphère Continuum »	
I.- L'eau dans le système sol – plante – atmosphère	4
II.- L'eau dans le sol	5
II.1.- Réserve en eau du sol	8
II.2.- L'évaporation et l'humidité du sol.	11
II.3.- Evapotranspiration et tension de succion	12
II.4.- Equation fondamentales des transferts hydrique dans le sol	13
II.4.1.- L'équation de conservation de la masse	13
II.4.2.- La loi de Darcy. (1856)	14
II.4.3.- Equation de Richards (1931)	15
III.- L'eau et la production végétale	15
III.1.- L'évapotranspiration et l'ETP	16
III.2.- La profondeur racinaire	17
III.3.- L'indice foliaire . (LAI . Leaf Area Index)	18
III.4.- Exigences en Température des cultures	19
III.5.- La période critique au déficit hydrique	20
III.6.- Effet du déficit hydrique sur la plante et sur les composantes du rendement	20
a.- La période végétative	21
b.- La période de reproduction	21
c.- Période de maturation	21
III.7.- Besoins en eau des cultures	22
IV.- Relation « Eau - Sol – Plante – Atmosphère »	23
Chapitre 2 . « Modélisation du bilan hydrique à la parcelle »	
I.- Définition et principe du bilan hydrique	27
II.- But du bilan hydrique	28
III.- Equation du bilan hydrique	28
IV.- Evaluation et estimation des termes du bilan hydrique	30
V.- But de la modélisation du bilan hydrique	30
VI.- Principe de la modélisation du bilan hydrique	31
VII.- Présentation de quelques modèles de simulation du bilan hydrique ...	32
VII.1.- Le modèle de bilan hydrique « BILHYNA »	32
VII.1.1.- Objectif du modèle Bilhyna	32
VII.1.2.- Description du modèle	33
a. Paramètres d'entrée du modèle	33
a.1.- Le fichier climatique	33
a.2.- Paramètres liés au sol « Modèle.ini »	33

a.3.- Paramètres liés à la plante « Calendrier Cultural »	34
b.- Les paramètres de sorties du modèles	34
b1.- Le module « Sol »	34
b2.- Le module « croissance du végétal »	35
b3.- Le module « Ruissellement / Infiltration »	38
b4.- Module Infiltration, drainage profond et remontées capillaires	40
b5.- Le module « Captation » et « couplage de la captation avec l'Infiltration / Ruissellement »	40
b5.1.- Module Captation	40
b5.2.- Module « couplage de la captation avec Infiltration / Ruissellement »	43
b6.- Le module « Mulch »	45
b7.- Le « Bilan Hydrique »	48
VII.2.- Le modèle de bilan hydrique « Pilote »	48
a.- Les paramètres d'entrée du modèle	49
a1.- Le fichier climatique	49
a2.- Paramètres liés au sol	50
a3.- Paramètre liés à la plante	50
b.- Les paramètres de sortie du modèle	51
b.1.- Le module sol	51
b.2.- Le module « Croissance du végétal »	54
<u>Chapitre 3 . « Pilotage de l'irrigation »</u>	
I.- Définition et Objectif du Pilotage de l'Irrigation par Bilan Hydrique	62
I.1.- Définition du Pilotage de l'Irrigation	62
I.2.- Objectif du Pilotage de l'Irrigation	63
II.- Les étapes du pilotage de l'irrigation par bilan hydrique	63
II.1.- Détermination de la zone racinaire effective (ZRE)	64
II.2.- Détermination de l'eau disponible totale	65
II.3.- Détermination de la réserve facilement utilisable « RFU »	67
II.4.- Détermination du point de remplissage	67
II.5.- Détermination de l'eau du sol totale initiale dans la zone des racines effective	67
II.6.- Détermination des flux d'eau entrant et sortant de la zone racinaire effective	68
II.7.- La décision d'irrigation	69
II.8.- Ajustement du bilan hydrique	70
III.- Les méthodes des pilotages de l'irrigation	70
III.1.- Les méthodes liées au sol	70
III.1.1.- La teneur en eau du sol	71
a. Mesure destructrice (ou directe)	71
b. Mesure non destructrice (ou indirecte)	72
III.1.2.- Le potentiel hydrique	72

III.1.3.- Relation pF-humidité	73
III.2.- Méthodes liées à la plante	74
III.2.1.- La teneur en eau du végétale	75
III.2.2.- Le potentiel foliaire	75
III.2.3.- La résistance stomatique « Rs »	77
III.2.4.- La température foliaire	77
III.2.5.- Etat de développement du couvert foliaire	78
III.2.6.- Micro variation de diamètre d'un organe	78
III.2.7.- Flux de sève	79
VI.- Méthodes liées à l'atmosphère	79
<u>Matériels et Méthodes</u>	
INTRODUCTION	81
I.- PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	82
I.1.- Présentation du site	82
I.2.- Caractéristiques expérimentales	82
I.2.1.- Caractéristiques climatiques générales	82
I.2.2.- Caractéristiques climatiques de la région d'étude	83
a.- La température de l'air	83
b.- Humidité de l'air	84
c.- Vitesse du vent	85
d.- Durée d'insolation	86
e.- Les précipitations	87
f.- L'évapotranspiration de référence (ETo)	88
g.- Le déficit climatique P – Eto	90
h.- Le Rayonnement Global	91
I.2.3.- Caractéristiques pédologiques du site expérimental	92
II.- PRESENTATION DU MATERIEL VEGETAL	97
II.1.- Présentation de la culture	97
II.2.- Caractéristiques des deux variétés « Vitron » et « Simeto »	97
II.3.- Exigences en eau des cultures	99
II.4.- Mise en place de la culture	99
II.4.1.- Préparation du lit de semis	99
II.4.2.- Date et dose de semis	100
II.4.3.- Fertilisation	101
II.4.4.- Désherbage.	101
II.4.5.- Traitements phytosanitaires	101
II.4.6.- Récolte	101
III.- PROTOCOLES EXPERIMENTAUX	103
III.1.- Dispositifs expérimentaux	104
III.2.- Système d'irrigation	105
III.3.- Mesures effectuées	106
III.3.1.- La cinétique hydrique	106

III.3.2.- Mesures climatiques	107
III.3.3.- Mesures phytotechniques.....	108
- Suivi des différents stades phénologiques	108
- Mesure de l'évolution de l'enracinement	111
- Mesure de l'indice foliaire « LAI » (Leaf Area Index)	113
- Mesure du rendement en grain	116
<u>Résultats et Interprétations</u>	
INTRODUCTION	117
I.- Caractéristiques climatiques expérimentales	118
I.1.- La température de l'air	118
I.2.- Humidité de l'air	119
I.3.- Vitesse du vent	120
I.4.- Durée d'insolation	121
I.5.- Les précipitations	122
I.6.- L'évapotranspiration de référence (ETo)	124
I.7.- Le déficit climatique	126
II.- CINETIQUE DE LA RESERVE EN EAU DU SOL	128
II.1.- Traitements Pluviaux	128
II.2. Traitements Irrigués	132
II.3.Traitements Modérés	134
II.4.Traitements Sévères	136
III.- EVOLUTION DE L'INDICE DE SURFACE FOLIAIRE « LAI »	142
III.1.Traitements Pluviaux	142
III.2.Traitements Irrigués	146
III.3.Traitements Modérés	148
III.4.Traitements Sévères	150
IV.- EVOLUTION DES EVAPOTRANSPIRATIONS	157
IV.1.- Evapotranspirations Potentielles	157
IV.2.- Evapotranspirations Réelles	158
IV.2.1.- Les évolutions journalières	159
IV.2.1.1.- Traitements Pluviaux	159
IV.2.1.2.- Traitements Irrigués	160
IV.2.2.- Les évolutions cumulées	162
IV.2.2.1.- Traitements Pluviaux	162
IV.2.2.2.- Traitements Irrigués	165
V.- LES TERMES DU BILAN HYDRIQUE	167
V.1.- Traitements Pluviaux	167
V.1.1.- <i>Essai 2000</i>	167
V.1.2.- <i>Essai 2001</i>	169
V.1.3.- <i>Essai 2002</i>	171
V.2.- Traitements Irrigués	173
V.2.1.- <i>Essai 2000</i>	173

V.2.2.- <i>Essai 2001</i>	174
V.2.3.- <i>Essai 2002</i>	176
VI.- SIMULATIONS DES IRRIGATIONS.....	178
VI.1.- Irrigations à 20 % d'épuisement de la réserve.....	179
VI.1.1.- <i>Essai 2000</i>	179
VI.1.2.- <i>Essai 2001</i>	181
VI.1.3.- <i>Essai 2002</i>	182
VI.2.- Irrigations à 50 % d'épuisement de la réserve.....	184
VI.2.1.- <i>Essai 2000</i>	184
VI.2.2.- <i>Essai 2001</i>	185
VI.2.3.- <i>Essai 2002</i>	186
VII.- INTERPRETATION DU MULCH.....	187
VIII.- RENDEMENT.....	190
CONCLUSION GENERALE.....	191
Références Bibliographiques.	
Annexes.	



*Introduction
Générale*

L'Algérie souffre du phénomène de pénurie chronique d'eau dues à des sécheresses récurrentes ce qui met en danger le développement économique et agricole du pays. Les ressources en eau sont insuffisantes pour couvrir les besoins des populations, de l'agriculture et de l'industrie. Ce manque d'eau a conduit à un déficit très important en produits alimentaires céréaliers, spécialement le blé dur base des aliments qui constitue une tradition culturelle bien ancrée dans le pays .

Les ressources en eau en Algérie restent limitées, inégalement réparties et ont subi durant les deux dernières décennies les effets négatifs de la sécheresse, pollution et mauvaise gestion. Les potentialités hydriques sont évaluées à **19.4** Milliards de m³/an dont 12 Milliards de m³/an sont mobilisables et réparties comme suit :

- **6.8** Milliards au Nord (**5** Milliards de m³/an pour les eaux de surface et **1.8** Milliards de m³/an pour les eaux souterraines).
- **5.2** Milliards dans les régions Sahariennes (non renouvelables).

Les ressources en eau actuellement utilisées en Algérie s'élèvent à près de 4.250 Milliards de m³. La consommation en eau, par secteur d'activité, se répartit comme suit :

- L'agriculture : 2.550 Milliards de m³.
- L'alimentation en eau potable et industrielle : 1.50 Milliards de m³.
- La production de l'énergie électrique nécessite : 0.20 Milliards de m³.

Dans le but de rationaliser l'utilisation de la ressource en eau et limiter le déficit, le pilotage des irrigations reste le meilleur moyen permettant de mieux gérer une denrée rare et précieuse " L'eau ". Le pilotage de l'irrigation repose essentiellement sur des signaux plus ou moins efficaces provenant soit de l'atmosphère, soit de la plante, ou bien du sol indiquant l'apparition du stress hydrique. Les techniques de pilotage visent à améliorer l'efficacité de l'irrigation en se basant sur des connaissances de la physiologie de la plante et de la réserve en eau du sol.

L'utilisation du bilan hydrique du sol comme indicateur de stress hydrique a un fondement théorique discutable (*Tardieu et al. 1990, cité par FILALI, 2003*). 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*).

Le suivi du bilan hydrique qui dépend particulièrement des conditions pédoclimatiques impose le recours à la modélisation dans le but d'assurer une meilleure comparaison des résultats obtenus sur terrain et ceux simulés par des modèles numériques. La modélisation devient donc indispensable et permet de disposer de capacité de simulation et de prévision, permettant des études de scénarii alternatifs pour aider à établir une meilleure gestion de l'irrigation.

Depuis plus d'une dizaine d'années un certain nombre de modèles de cultures ont été proposés tels que : *Budget, Stics, Pilote, Bilhyna* et autres. La plupart de ces modèles sont des outils de recherche utilisés comme aide à la compréhension des processus. Ils sont de complexité variable mais ont en commun le défaut d'utiliser un trop grand nombre de paramètres nécessitant un effort important de calage. Cette sur paramétrisation leur confère un caractère peu opérationnel même lorsque leurs objectifs se limitent à l'analyse de l'impact de la restriction hydrique sur la production.

C'est ainsi que nous nous sommes fixés comme objectif principal de tester deux modèles, *Bilhyna* (élaboré par l'équipe de M. *Alain Perrier* à l'Institut National Agronomique de Paris Grignon) et *Pilote* (élaboré par M. *Jean Claude Mailhol* du Cemagref de Montpellier) dans le cadre de travaux effectués à l'Institut National Agronomique d'Alger portant sur " *Ressources en eau et irrigation de complément des cultures, plus particulièrement les céréales*". Ces deux modèles présentent deux approches différentes en ce qui concerne les simulations des transferts en eau dans le sol et la cinétique de croissance (à travers l'indice foliaire LAI).

Nous nous proposons donc, à travers ce travail, une "paramétrisation" des deux programmes dans le contexte des essais sur les irrigations de la culture du blé dur dans la Mitidja. Cette paramétrisation vise à rechercher les

caractéristiques du site expérimental, liés au sol et à la plante, constituant les données d'entrée des modèles, permettant l'obtention de meilleurs "calages". La confrontation entre les résultats "simulés" par les modèles et ceux "mesurés" a concerné deux paramètres fondamentaux :

- *La réserve en eau du sol*
- *L'indice foliaire LAI*

Notre document a été structuré en 3 grandes parties :

- *Une partie « **bibliographique** » ayant pour objectif de faire une mise au point sur les aspects liés à notre thème d'étude.*
- *Une partie « **matériels et méthodes** » permettant de décrire les six (06) protocoles expérimentaux (de 2000 à 2005) ainsi que les méthodes utilisées.*
- *Une partie « **résultats et interprétations** » comprenant les discussions concernant les différents aspects analysés.*

Nous terminerons ce travail par une « **conclusion générale** » qui consistera à mettre en relief les résultats obtenus durant l'étude et ouvrira, éventuellement, d'autres perspectives de recherche dans le même contexte.

Partie I :
Synthèse Bibliographique

Chapitre 1 :

« Circulation de l'eau dans le système Sol – Plante – Atmosphère Continuum »

I.- L'eau dans le système sol – plante – atmosphère :

La circulation de l'eau dans le système sol – plante – atmosphère – continuum (SPAC) dépend de la structure de la plante (système foliaire et racinaire en tant que surface d'échange), mais aussi de sa structure tissulaire et de son fonctionnement physiologique.

Dans le système SPAC, l'eau circule habituellement et de manière continue de bas en haut pour l'évaporation et du haut vers le bas pour l'irrigation, le tout fonctionne comme une pompe aspirante dont le moteur est la succion exercée par le pouvoir évaporant de l'air et où la source de l'eau est dans le sol, qui retient celle – ci de manière variable selon les états de l'eau dans le sol (Figure 01). La réserve en eau du sol est très importante à cet effet, car plus elle baisse et plus les plantes doivent exercer une succion importante pour extraire l'eau. Cela ralentit l'évapotranspiration et augmente l'écart entre l'ETP et l'ETR.

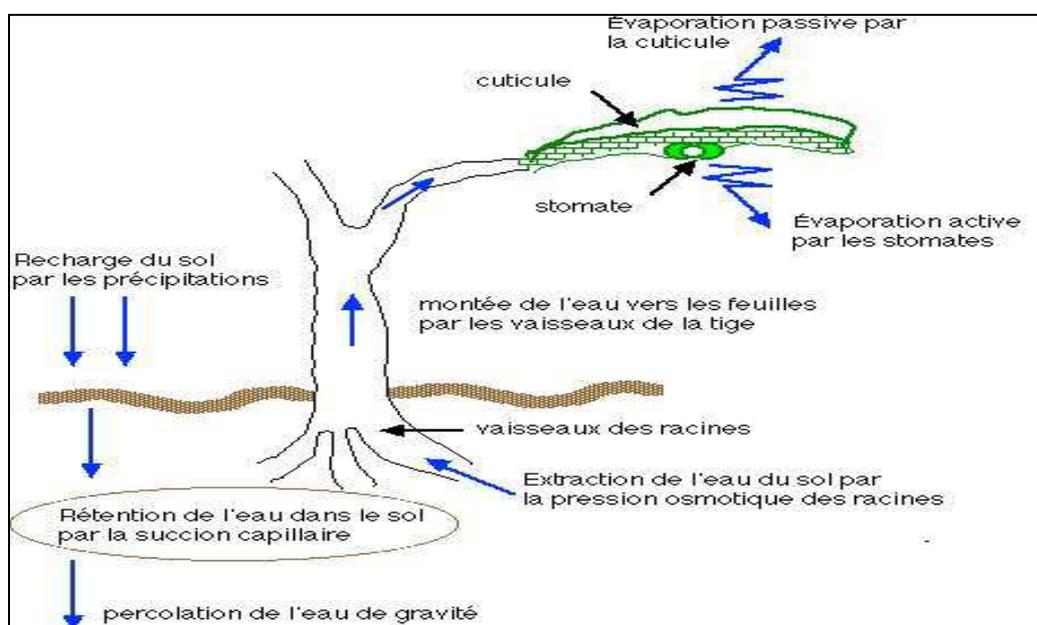


Figure 01 : Représentation schématique de la circulation de l'eau dans le SPAC. (Bonn, 2002)

La sou... ipitations et l'infiltration et cela a pour effet de changer la force avec laquelle le sol retient

l'eau. Les racines extraient l'eau du sol par succion osmotique, causée par les sels dissous dans leurs tissus. Le sol, quant à lui, retient l'eau par succion capillaire. Cette succion est d'autant plus forte que le sol est plus sec. Il y a donc compétition entre le sol et les racines pour aspirer l'eau.

Dans la plante, le processus d'aspiration continue et l'eau monte dans les vaisseaux libéro – ligneux pour atteindre les feuilles, où a lieu les échanges gazeux avec l'atmosphère. L'eau peut s'évaporer à travers la cuticule et à travers les stomates. La cuticule présente en générale une résistance constante à l'évaporation, alors que les stomates peuvent s'ouvrir et se fermer selon les conditions hydro – climatique que subit la plante.

II.- L'eau dans le sol :

Le sol fournit à la plante l'eau qui lui permet de croître et de se développer entre deux pluies, et de supporter des périodes sèches plus ou moins longues. C'est un milieu poreux qui est constitué de particules solides entre lesquelles circulent les deux éléments indispensables à la plante : l'eau et l'air. L'irrigation et le drainage sont deux méthodes qui concourent à maintenir, dans des proportions convenables, l'eau et l'air du sol.

L'eau est retenue par les particules du sol sous forme d'adsorption mais surtout par la tension superficielle qui s'exerce à l'intérieur des pores dont les dimensions varient avec la nature du sol. Les sols constitués de particules relativement grosses (sables, par exemple) présentent des pores peu nombreux mais relativement grands où l'eau retenue par tension superficielle est moins importante, pour un volume de sol donné, que dans le cas d'un sol à particules plus fines (sols limoneux ou argileux) et donc à pores plus petits et plus nombreux.

Après une pluie, l'eau s'infiltré à la fois sous l'action de la pesanteur et sous celle d'une force de succion exercée par le sol quand il peut encore absorber de l'eau. Plus ou moins saturé près de la surface (les pores étant presque remplis d'eau), le sol va se « ressuyer », la pesanteur entraînant l'eau vers le bas. Cependant, au fur et à mesure que les pores se vident dans la zone saturée, la tension superficielle augmente et le mouvement de

l'eau vers le bas se ralentit. Un ou deux jours après la pluie, la quantité d'eau retenue dans le sol près de la surface n'évolue plus que très lentement. Les agronomes considèrent alors qu'elle est à peu près stationnaire et constitue alors la « *Capacité au Champ* ».

Sous l'effet de l'évaporation et de l'absorption d'eau par les racines, cette réserve d'eau diminue peu à peu en l'absence d'autres précipitations jusqu'au moment où il devient difficile pour la plante d'extraire l'eau alors retenue très fortement par le sol. Cette humidité résiduelle, difficilement accessible, correspond pour la plante au « *point de flétrissement* ».

La capacité de rétention en eau du sol est très importante dans l'évaluation des besoins en eau de la végétation. Cette capacité dépend de la texture du sol et varie d'un sol à un autre (Figure 02).

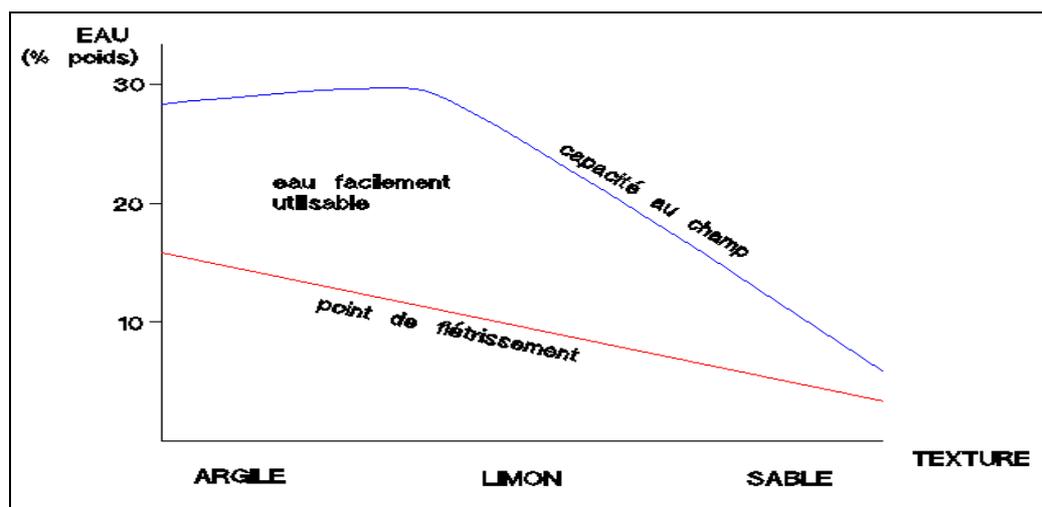


Figure 02 : Eau contenue dans le sol selon sa texture
(d'après Duchaufour in Beauchamp, 2002)

Sous nos climats, l'apport d'eau au sol se fait sous la forme de pluie, neige, rosée et brouillard. Toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol : une partie est évaporée directement pendant et après la pluie, les gouttes peuvent être interceptées en partie par le feuillage. L'eau qui atteint le sol ruisselle, s'infiltre et ré-humecte le sol. Les racines absorbent cette eau que la tige et les feuilles évaporent par transpiration, et une fraction réduite percole en profondeur et atteint la nappe. A partir d'une certaine profondeur, la teneur

en eau n'augmente plus : Le sol est saturé, cette zone saturée forme donc une nappe.

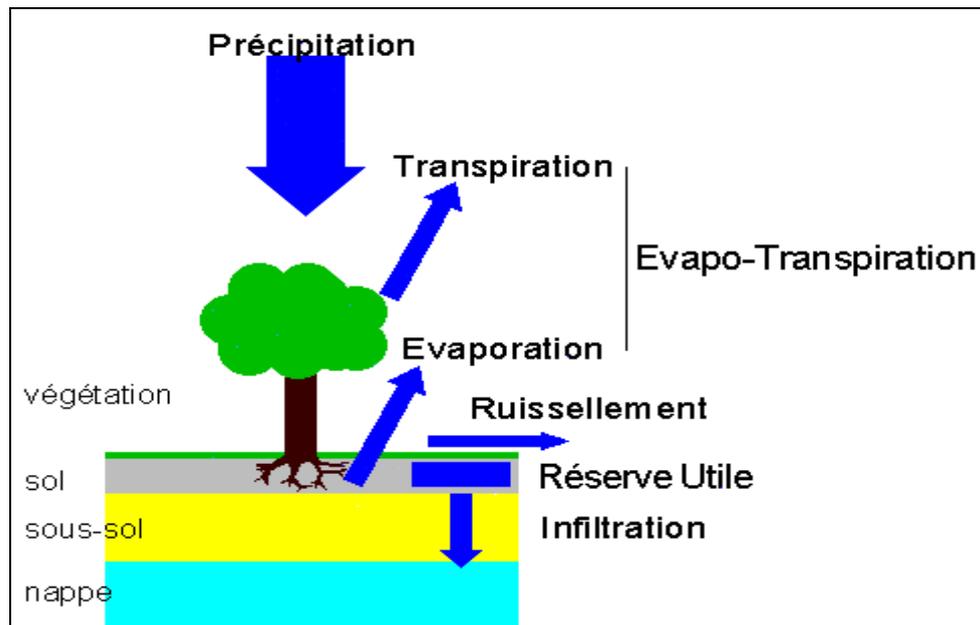


Figure 03 : Place de l'eau du sol dans le cycle de l'eau
(Beauchamp, 2002)

Si la pluie est importante, le sol ne peut pas absorber toute l'eau tombée, la partie supérieure du sol devient saturée mais le transfert vers la profondeur n'est pas assez rapide. Une pellicule d'eau s'accumule en surface et s'écoule selon la pente : c'est ce qu'on appelle ruissellement. Lorsque la surface du sol est imperméable, le ruissellement apparaît aussitôt que les dépressions du sol ont été remplies. La végétation favorise l'infiltration et s'oppose ainsi au ruissellement.

II.1.- Réserve en eau du sol :

C'est la quantité d'eau que peut contenir un sol et qui peut être disponible pour la plante, Le sol étant la source d'eau pour la plante. Cette réserve est exploitée en fonction de sa disponibilité et des caractéristiques du système racinaire (profondeur, densité...). Il est donc nécessaire de connaître les différents paramètres représentatifs de la disponibilité de l'eau dans le sol et les différentes relations qui les relie.(Polge de Combret, 1990).

Au champs, deux mesures permettent d'évaluer la disponibilité de l'eau dans le sol : La teneur en eau volumique « θ_v », et l'énergie avec laquelle l'eau est retenue dans le sol : Le potentiel ou tension « ψ_s » (chapitre III). La texture et la structure du sol conditionnent la rétention et la circulation de l'eau. L'eau intervient aussi bien sur le comportement physique (cohésion, stabilité structurale, etc.) que sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols (altération, solubilisation, transports des éléments dissous, aération, etc.) (Vilain, 1997).

Le sol constitue pour les végétaux un réservoir d'eau assez particulier puisqu'il exerce une rétention variable selon la quantité présente et qu'une fraction seulement de son contenu est utilisable, la « réserve utile » (RU) (Figure 04).

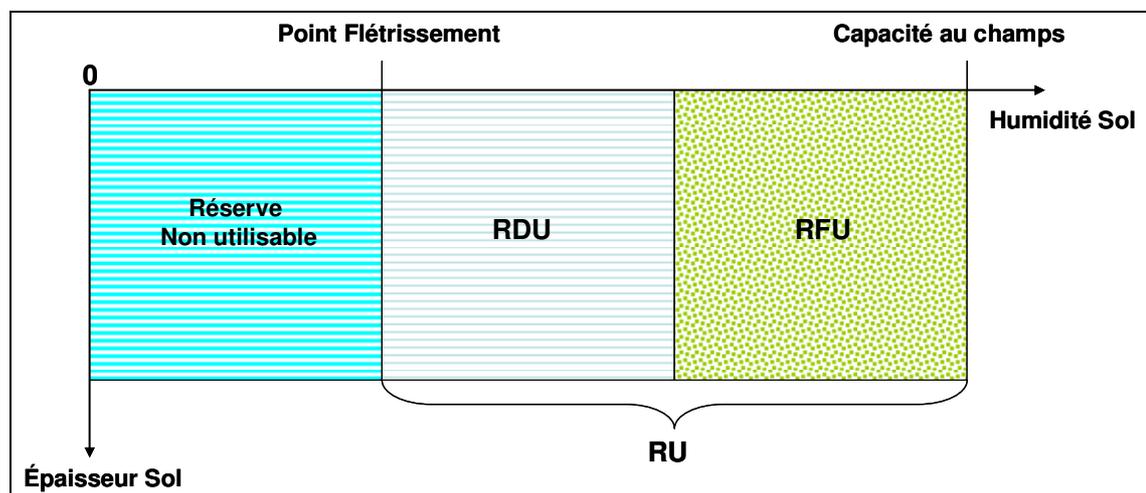


Figure 04 : Disponibilité de l'eau d'une couche de sol pour les plantes (Ruelle et al, 1995).

RU : réserve utile : eau utilisable par la plante

RFU : réserve facilement utilisable

RDU : réserve difficilement utilisable (réserve de survie)

Le volume d'eau disponible pour les plantes appelé « Réserve utile » comprend la « Réserve facilement utilisable (RFU) » (eau disponible à la plante) et la « Réserve Difficilement utilisable ou Réserve de survie (RDU) » (eau non disponible). Cette « RU » dépend de deux paramètres : la profondeur du sol colonisée par le système racinaire (1 m environ pour les cultures annuelles de blé ou de maïs) et la texture du sol. Pour une profondeur d' 1 m,

on obtient des valeurs de la réserve utile allant de 70 mm d'eau pour un sol sableux grossier à 200 mm d'eau pour un sol limono - argileux. (Figure 05). Le rapport « RFU / RU » est généralement pris voisin de (0,5), il peut varier en fonction du type de sol, de l'espèce et de la demande climatique.

L'utilisation des réserves dépend de l'enracinement, qui progresse avec la croissance des plantes. Pour ne pas avoir de « stress hydrique », il faut que la plante puisse trouver à chaque instant le volume d'eau nécessaire dans le sol. Les racines peuvent puiser l'eau entre « Rcc » et « Rpfp » (Figure 05) :

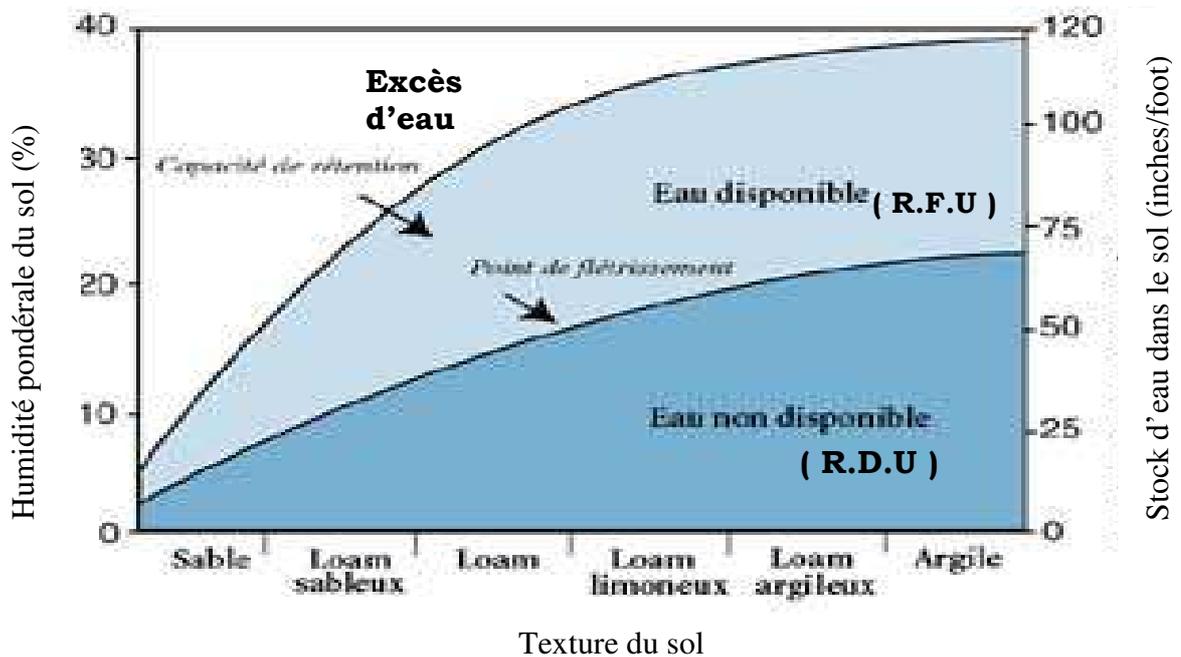


Figure 05 : Rapport entre la texture et l'eau du sol
(Anonyme, 2003)

La réserve utile « RU » est définie comme étant égale à la différence entre la réserve à la capacité au champ et la réserve au point de flétrissement permanent, exprimées en (mm/cm de profondeur racinaire), pour le même type de sol :

$$RU = (Rcc - Rpfp) \cdot da \cdot Z \dots\dots\dots (01)$$

Avec :

Rcc et Rpfp : humidité pondérales en % ;

da : densité apparente du sol ;

Z : profondeur d'enracinement en m.

➤ Réserve à la capacité au champ « Rcc » : c'est la limite supérieure, au-delà de laquelle le sol est théoriquement plein sans être cependant engorgé. elle est mesurée *in situ*.

➤ Réserve au point de flétrissement permanent « Rpfp » : c'est la limite inférieure, elle définit le niveau à partir duquel l'eau dans le sol n'est plus accessible à la plante. Peut être mesurée au laboratoire.

La texture du sol (granulométrie) a une importance primordiale sur la capacité au champ et le point de flétrissement. En effet, c'est entre les particules du sol que se trouve l'eau capillaire absorbable, la quantité d'eau que le sol peut retenir ne peut pas dépasser l'espace disponible entre les particules de sol et elle est limitée par le pouvoir de rétention du sol (Figure 06). Ces deux limites dépendent de la granulométrie. Les sols à texture fine (argiles, limons) ont des interstices plus petits et un rapport surface/volume des particules plus élevé que les sols à texture grossière (sable), ils exercent donc sur l'eau une plus grande succion capillaire, ce qui illustre le fait que plus la texture est fine, plus le sol retient l'eau de manière vigoureuse (Bonn , 2002).

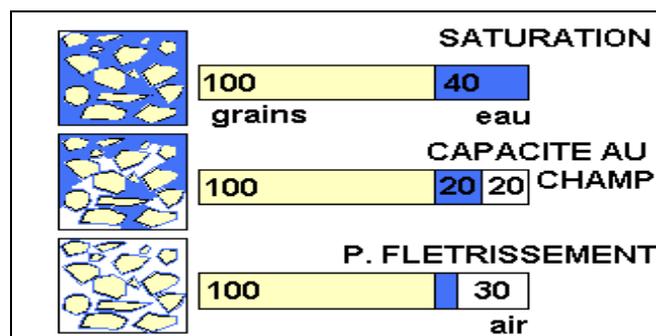


Figure 06 : L'état de l'eau dans le sol
(Beauchamp, 2002)

La teneur en eau est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol. Le volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir est la « Capacité au Champ » (ou Capacité de Rétention) du sol qui dépend essentiellement de la granulométrie du sol. Prés de la surface, le sol n'est pas saturé, les espaces vides

contiennent de l'eau et de l'air, l'eau est soumise aux forces de gravité et de capillarité.

II.2.- L'évaporation et l'humidité du sol.

En raisonnant sur un couvert végétal bien établi et une réserve en eau « R » diminuant à partir de la réserve utile, on constate une diminution de l'ETR par rapport à sa valeur maximale (ETM). Pour simplifier, on considère qu'il existe un palier jusqu'à une certaine valeur de la réserve utile, notée « RU/c », où la consommation d'eau est maximale puisque au – dessous de cette valeur, la consommation diminue de façon linéaire, ce qui conduit au « modèle » simple :

$$\boxed{\text{ETR} / \text{ETM} = c (R / \text{RU})} \dots\dots\dots (02)$$

On considère souvent que « c » est voisin de 2, mais il faut bien voir qu'il ne s'agit là que d'une moyenne statistique et non d'une réalité physique. En fait, la réaction de la culture à la diminution de l'humidité du sol est fonction de plusieurs facteurs qui justifient la notion de système Sol – Plante – Atmosphère. Quand le sol épuise rapidement sa réserve en eau, quand « la demande climatique » (ETP) est forte et quand le système racinaire est peu profond et peu vigoureux, l'évapotranspiration chute rapidement. (*Beauchamp, 2002*)

II.3.- Evapotranspiration et tension de succion :

Une partie de l'eau pénétrant dans le sol s'évaporée de nouveau dans l'atmosphère, soit directement par l'intermédiaire des plantes (l'ensemble de ces pertes en eau constitue l'évapotranspiration). L'évaporation se fait surtout à la surface du sol. Même pendant la pluie, une partie de l'eau est immédiatement ré-évaporée car l'atmosphère n'est pas saturée en eau. Le départ de l'eau superficielle fait remonter l'eau des zones plus profondes, la quantité évaporée diminue avec la quantité retenue dans le sol car les forces de capillarité s'opposent à son départ et l'énergie nécessaire pour extraire l'eau est d'autant plus grande que le sol s'appauvrit en eau.

Les forces de capillarité entre les grains et la tension superficielle du film d'eau autour des grains déterminent un potentiel matriciel qui tend à retenir l'eau et qui peut être mesuré à l'aide d'un tensiomètre. La succion du sol dépend de sa texture et de la taille des pores, de la quantité d'eau contenue par rapport à sa capacité au champ (quantité maximale absorbée), ainsi que des conditions climatiques qui sont également déterminantes. (Figure 07)

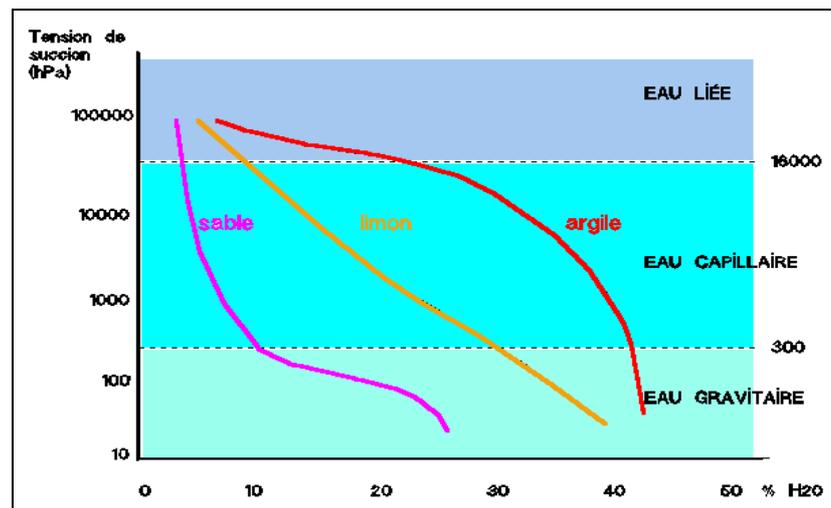


Figure 07 : Tension de succion selon la texture du sol
(Beauchamp, 2002)

La transpiration des plantes extrait l'eau de la zone non saturée du sol, parfois même de la zone saturée. Cette extraction est possible jusqu'à une certaine valeur limite de la teneur en eau du sol, les racines doivent vaincre le potentiel matriciel qui retient l'eau et qui augmente avec le départ de l'eau ; au-delà d'une certaine valeur, la plante ne peut plus vaincre la tension et satisfaire son besoin, elle « flétrit ». Le point de flétrissement d'une plante varie d'une espèce à l'autre. L'eau extraite par les racines des plantes, circule dans la tige et les feuilles où elle s'évapore à travers les stomates dans l'atmosphère ; le soleil fournit l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau. La transpiration d'un végétal est réglée par l'ouverture des stomates, cette dernière dépend de la nature et de l'état hydrique du végétal ainsi que des conditions climatiques (rayonnement solaire, température de l'air, déficit de saturation de l'air).

L'évapotranspiration réduit la quantité d'eau s'infiltrant vers la nappe, la teneur en eau du sol peut donc descendre au – dessous de la capacité au

champ et même atteindre le point de flétrissement près de la surface (un courant d'eau capillaire s'établit depuis la profondeur). La perte en eau d'un sol est plus faible lorsque celui – ci est nu, car il se forme une croûte superficielle (Mulch) qui limite l'évaporation des couches adjacentes du sol. Les remontées capillaires sont importantes lorsqu'il existe une nappe (l'eau peut remonter jusqu'à 1 m au-dessus du niveau de la nappe dans un sol limoneux et être utilisée par les racines).

II.4.- Equation fondamentales des transferts hydrique dans le sol :

II.4.1.- L'équation de conservation de la masse :

La loi de conservation de la masse, exprimée par l'équation de continuité, stipule que si le régime d'écoulement qui entre dans l'élément de volume est supérieur au régime d'écoulement qui en sort, l'élément de volume doit emmagasiner l'excès et sa teneur en eau doit s'accroître, et inversement, si l'écoulement à la sortie dépasse celui à l'entrée, la teneur en eau doit décroître (*Hillel, 1980*). Cette équation s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} \dots\dots\dots (03)$$

avec :

θ : teneur en eau volumique (mm^3/mm^3) .

t : temps (s).

z : profondeur (cm).

q : flux d'eau (mm/s).

II.4.2.- La loi de Darcy. (1856) :

L'équation de Darcy est, le plus souvent, utilisée pour décrire les mouvements d'eau du sol, pour les milieux saturés et étendue aux milieux non saturés. Elle traduit la proportionnalité entre les flux et le gradient de charge hydraulique :

$$q = - k (h) \frac{dH}{dz}$$

.....(04)

q : Flux d'eau ou vitesse de Darcy (mm/s) ;

K(h) : Conductivité hydraulique (mm/s) ;

H : Tension matricielle ou succion (mm).

La conductivité hydraulique exprime la capacité du sol à transmettre l'eau suivant son état de saturation exprimé en fonction de « h », et elle atteint sa valeur maximale à saturation « Ks », elle dépend de la concentration d'eau. Le gradient de charge hydraulique permet de déterminer le sens de déplacement des flux hydriques. Si la relation « K(h) » est connue, les flux hydriques tels que les remontées capillaires et le drainage peuvent être déduits par application de la loi de Darcy en utilisant les données tensiométriques (Nemeth, 2001). « H » est la charge hydraulique à la côte « z » et s'exprime en fonction de la pression de l'eau dans le sol par : $H = h - Z$, toute différence de charge entre deux points à des profondeurs différentes induira un écoulement dans le sens des charges décroissantes. L'équation 05 peut donc s'écrire comme suit :

$$q = -k(h) \left(\frac{dh}{dz} - 1 \right) \dots\dots\dots (05)$$

II.4.3.- Equation de Richards (1931) :

Richards a introduit le concept de capacité capillaire C_w (m^{-1}), qui exprime la facilité avec laquelle un sol libère ou emmagasine l'eau quand il est soumis à une variation de pression :

$$C_w(h) = \frac{d\theta}{dh} \dots\dots\dots(06)$$

En utilisant les trois équations (03, 05, 06) on obtient l'équation suivante :

$$C_w(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right]$$

..... (07)

La présence des fonctions $K(h)$ et $C_w(h)$ et leurs fortes variations avec la pression (h) ou l'humidité (θ), confèrent à cette équation un caractère fortement non linéaire (Nemeth, 2001).

III.- L'eau et la production végétale :

La plante joue un rôle important dans la circulation de l'eau, de façon directe à travers ses propres caractéristiques sur la valeur de la résistance moyenne sol – racines et de façon indirecte sur les propriétés du sol. En effet, la structure du système racinaire, biomasse ou volume et longueur ou surface d'échanges avec le sol son autant de paramètres propres qui réduisent cette résistance et améliorent l'absorption de l'eau. D'un autre côté, la plante intervient aussi par la porosité et la matière organique qu'elle crée dans le sol en favorisant, par conséquent, la biologie des sols et améliore leurs propriétés de rétention et de diffusion de l'eau.

Les plantes se servent de l'eau pour développer leurs tissus à l'aide du processus de la photosynthèse et pour régulariser leur température. Elles agissent à la manière des pompes tirant l'eau du sol et l'acheminant dans les feuilles, d'où elle s'évapore dans l'atmosphère. Ainsi, les trois principaux facteurs qui déterminent la quantité d'eau dans le sol qu'utilisent les plantes sont :

- Le type de plante.
- La quantité d'eau dans le sol qui peut être absorbée par les plantes.
- La quantité d'eau que l'atmosphère peut tirer des plantes et du sol.

La transpiration est le processus par lequel l'eau du sol se perd dans l'atmosphère après être passée dans la plante. La quantité maximale d'eau que les plantes peuvent absorber dans des conditions idéales et l'évaporation inévitable du sol constituent ce que l'on appelle l'ETP, qui dépend des

conditions météorologiques. Les jours venteux et chauds, les plantes puisent beaucoup d'eau dans le sol.

III.1.- L'évapotranspiration et l'ETP :

La plante consomme des quantités d'eau bien supérieures à celles qu'elle fixe dans ses tissus, elle est en fait constamment traversée par un flux d'eau dont la majeure partie est transpirée et donc rejetée dans l'atmosphère. Cette fraction est appelée évapotranspiration.

L'évapotranspiration potentiel « ETP » est déterminée par les conditions climatiques : rayonnement solaire, température de l'air, humidité de l'air, et vitesse du vent. L'évapotranspiration réelle « ETR » correspond à la quantité d'eau réellement perdue par une culture, son importance dépend de la demande atmosphérique, des caractéristiques du couvert végétal et de son alimentation hydrique, elle atteint une valeur maximale « ETM » si l'alimentation hydrique n'est pas restrictive.

L'ETM est calculée à partir de l'évapotranspiration potentielle « ETP » en appliquant un coefficient cultural « K_c » dépendant du type de culture et de son état de développement, on peut alors écrire que :

$$\boxed{ETM = K_c \cdot ETP} \dots\dots\dots (08)$$

Pour une culture bien alimentée en eau, l'évaporation de l'ensemble du sol et des plantes, c'est-à-dire l'évapotranspiration, dépend essentiellement de l'énergie disponible et non des réactions spécifiques de la plante. Il s'agit alors d'un phénomène physique, où le contrôle biologique n'intervient pas, identique dans son approche à l'évaporation d'un plan d'eau, n'est différent, en fait, que par les caractéristiques physiques de la surface (un grand plan d'eau, plus lisse et réfléchissant moins l'énergie solaire, évapore en générale 25 % d'eau de plus qu'une grande surface végétale irriguée).

III.2.- La profondeur racinaire :

La profondeur racinaire est la profondeur du réservoir sol que la culture peut atteindre pour obtenir l'eau se trouvant à la réserve utile « RU ». Elle diffère d'une espèce à une autre et le développement des racines est parallèle au développement de la culture. Plusieurs facteurs contrôlent son développement, tels que : le stade de développement de la culture, la profondeur du sol utilisable, le compactage du sol, les caractéristiques du sol et la quantité d'eau dans le sol. L'évolution des caractéristiques du système racinaire et sa distribution dans le sol, jouent un rôle primordial visant à déterminer l'aptitude de la culture à utiliser l'eau disponible dans le sol. La « profondeur racinaire potentielle » est la profondeur maximale d'un plant qui se développe dans des conditions d'alimentation hydriques optimales, sans barrière ou restriction qui bloquent son allongement . Quand l'eau est présente dans le sol en quantité suffisante, la quantité absorbée par la culture est en relation avec la distribution des racines dans le sol, environ 70% de l'eau utilisée par les plants provient de la moitié supérieure de la zone racinaire (Figure 07) , cette zone est appelée « profondeur racinaire efficace », elle dépend des caractéristiques de la culture et du sol. (Filali, 2003).

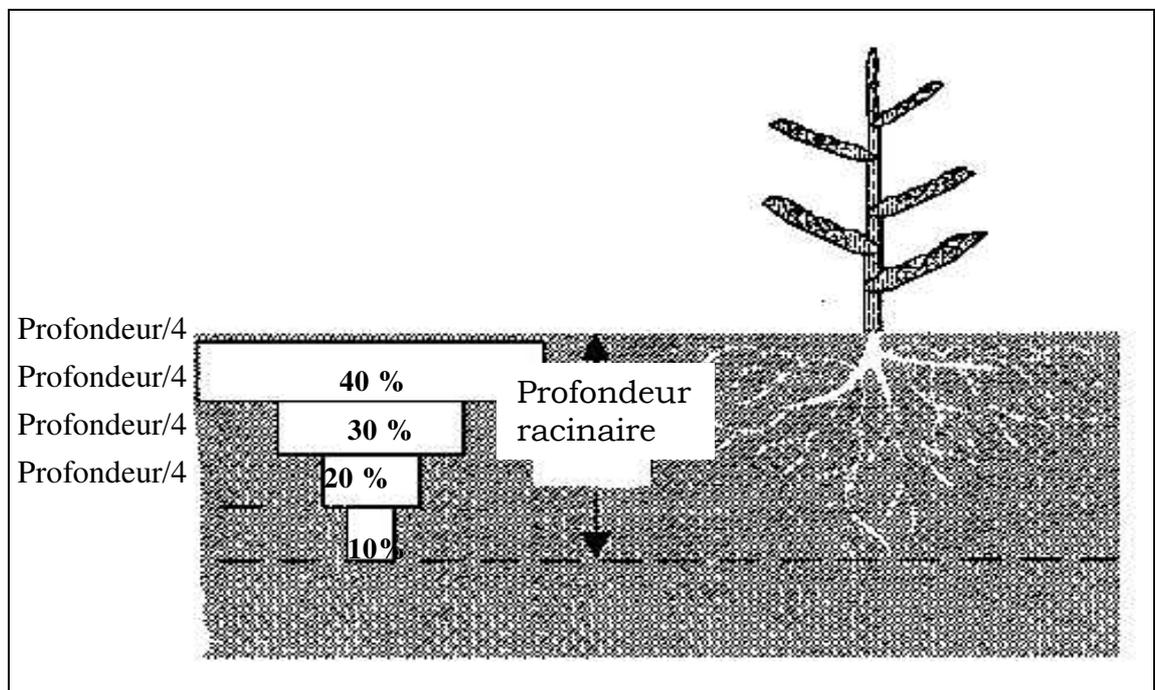


Figure 08 : La quantité d'eau prélevée par les plantes influencée par la distribution des racines dans le sol (Evans et al., 1996).

L'indice foliaire est défini comme étant la surface foliaire par unité de surface du sol (m^2/m^2). La méthode la plus répandue consiste à relier la surface d'une feuille à ces dimensions :

$$S = L \cdot l \cdot K \quad \dots\dots\dots (09)$$

Où :

S : la surface de la feuille.

L : la longueur de la feuille.

l : la largeur mesurée au milieu de la feuille.

K : coefficient d'ajustement qui dépend de l'espèce.

(0.65 pour le blé (De *Parceveaux et Catsky, 1970 ; Olufayo, 1994*)).

La plupart des processus essentiels à la croissance et au développement d'une culture comme la transpiration, l'évaporation, les transferts radiatifs, les échanges de chaleur, de vapeur d'eau et de gaz, au sein d'un couvert végétal, dépendent de la densité et de l'orientation du feuillage. L'absorption des radiations électromagnétiques conditionne plus ou moins directement les processus biologiques essentiels. C'est, en effet, cet indice qui, en premier lieu conditionne l'interception du rayonnement incident.

Il est difficile d'acquérir des variables telles que le « LAI », l'utilisation de plusieurs variables plus commodes (taux de couverture) nécessitent une connaissance de la structure de la plante. Le principal paramètre architectural d'un couvert végétal est l'indice foliaire qui est, en fait, le rapport entre la surface des feuilles et la surface du sol occupée par la plante.

De nombreux auteurs ont étudié la relation de l'état hydrique d'une culture et l'indice foliaire, il est à noter qu'en dehors du rendement l'apparence de la plante sous stress est le critère le plus utilisé pour sélectionner la variété résistante à la sécheresse.

Brisson (1989), a considéré que les valeurs de l'indice de surface foliaire reflètent l'état hydrique des plantes, donc leur potentiel de production.

Mailhol et al. (1997), montre que le « LAI » est considéré comme un indicateur potentiel de la consommation en eau des plantes.

III.4.- Exigences en Température des cultures :

Les demandes en températures optimales, dans le cas du blé dur, sont diverses selon les différentes phases de son développement :

- Phase germination : les températures varient de 0°C à 43°C. et la température optimale est de 27°C.
- Phase floraison : la température durant cette phase est de 16.5°C.
- Phase maturation : la température optimale est d'environ 20°C.

III.5.- La période critique au déficit hydrique :

Le déficit hydrique est un phénomène courant durant le cycle de développement des plantes. Il est lié à la réduction de l'humidité du sol et à l'augmentation de la demande évaporative, il se traduit rapidement par une réduction de la croissance de la plante. (*Rekika, 1996 ; in Mokrani 2000*)

La réaction au manque d'eau varie selon les espèces végétales et les conséquences diffèrent selon l'époque où il se produit. On distingue deux types de période : les périodes sensibles et les périodes critiques.

- Une période est dite « sensible » : lorsqu'une restriction a pour effet de limiter la croissance, ceci se produit essentiellement en phase végétative.
- Une période est dite « critique » : lorsque le manque d'eau apparaît durant une phase où les organes reproducteurs sont initiés, les conséquences sont alors une baisse du rendement d'autant plus importante que la période d'initiation est courte et il n'existe aucune possibilité de compensation comme un tallage ou la formation d'organes floraux secondaires. Les périodes critiques varient avec les espèces (Tableau 01).

Tableau 01 : Période critiques de quelques Cultures (*Vilain, 1997*).

Espèces	Situation de la période critique
Blé	Avant épiage.
Maïs	De part et d'autre de l'apparition de l'inflorescence mâle.
Betterave sucrière	Pendant le développement de la racine.
Pomme de terre	Pendant la formation des tubercules.

III.6.- Effet du déficit hydrique sur la plante et sur les composantes du rendement :

Selon sa durée, son intensité et le moment de son apparition, le manque d'eau peut engendrer des pertes de rendement importantes. Il est donc nécessaire de connaître les périodes de sensibilité au déficit hydrique, et qui sont :

a.- La période végétative :

On constate un déficit hydrique pendant le tallage et en période de montaison, il affecte le nombre d'épis par m² et surtout la fertilité des épis.

b.- La période de reproduction :

Durant cette période, les talles herbacées deviennent plus nombreuses et se mettent à croître. Certaines vont donner des épis et d'autres verront leur développement se ralentir et régresseront. Une fois les épis constitués, les fleurs apparaissent et la fécondation se produit. Si l'évapotranspiration est élevée, la plante dépense beaucoup d'énergie pour transpirer et formera alors moins de fleurs fertiles, donc moins de grains. (*Larousse Agricole, 1981*)

Les déficits de montaison vont directement pénaliser deux composantes du rendement, le nombre d'épis par m² et surtout le nombre de grains par épi, et avoir aussi des conséquences indirectes sur le poids de mille grain, car ils diminuent la croissance des tiges qui sont les organes essentiels de réserve (*Gate et al, 1992*).

c.- Période de maturation :

Elle s'étend de la fécondation au stade de maturité du grain, pendant cette phase appelée « palier hydrique » où le grain accumule très fortement de l'amidon dans son albumen, tout déficit hydrique a pour effet de ralentir les synthèses et la migration des réserves nécessaires à la formation du grain ; ce qui conduit à la formation de grains ridés de poids inférieur à la normale « phénomène d'échaudage ».

Un déficit hydrique après la fécondation a un effet uniquement sur le poids de mille grains. En effet, ce déficit réduit la taille des enveloppes du grain quand il se manifeste du stade grain laiteux au stade de maturité physiologique (*Gate et al., 1992*).

III.7.- Besoins en eau des cultures :

Les besoins en eau des cultures représentent le volume d'eau requis pour l'évapotranspiration, depuis la date de plantation jusqu'à la date de récolte. Une meilleure connaissance des besoins en eau permet une utilisation rationnelle de l'eau d'irrigation. Selon *Jacquart et Choisnel, 1985 (in Bouras, 2001)* les besoins en eau d'une culture dépendent de plusieurs facteurs, tels que :

- Les facteurs liés au climat (données météorologiques qui permettent le calcul de la demande climatique : ETP)
- Les facteurs liés à la plante (densité de population, stade phénologiques ...etc).
- Les facteurs liés au sol (texture du sol, profondeur, réserve utile ... etc)

Tous ces facteurs doivent être pris en considération dans le calcul des besoins en eau des cultures.

Selon la FAO, le besoin en eau d'une culture représente « la quantité d'eau nécessaire à couvrir les pertes en eau par évapotranspiration d'une culture saine, cultivée en grande parcelle, sans contraintes du sol (fertilité et humidité), et réalisant son potentiel de production sous les conditions considérées ». Cette définition correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture « ETM » qui dépend de la demande climatique « ETP » et du coefficient cultural « K_c ». (*cité par : Djab, 2002*)

Par définition, les besoins en eau d'une culture peuvent, donc, être calculés comme suit :

$$ETM = ETP \cdot K_c \dots\dots\dots (10)$$

Le coefficient cultural « K_c » qui met en rapport l'évapotranspiration maximale « ETM » avec l'évapotranspiration de référence « ETP » varie selon les stades physiologiques du blé (tableau 02).

Tableau 02 : Evolution des coefficients culturaux « K_c » pendant le cycle du blé.

Stade	K_c
Période végétative	0,3
Montaison	0,7
Gonflement	0,8
Epiaison	1,05
Floraison	1,2
Grain laiteux	0,75
Grain pâteux	0,65
Maturation	0,25

Source : FAO, 2000 (in Imache, 2001).

IV.- Relation « Eau - Sol – Plante – Atmosphère » :

L'eau joue un rôle essentiel au niveau des processus qui conditionnent la production dans le système climat – plante – sol. Les mouvements de l'eau dans le « SPAC » sont la conséquence des différences de potentiel de l'eau. Ces dernières sont directement fonction des conditions climatiques et de l'humidité disponible dans le sol. Une atmosphère sèche, chaude, ensoleillée et venteuse exercera une très forte succion sur l'eau du « SPAC ». Les conditions climatiques antécédentes ont une importance majeure sur le comportement de la plante, puisqu'elles commandent l'humidité du sol et donc le potentiel de l'eau au départ. L'eau consommée par les plantes, permet l'hydratation des tissus donc, favorise la croissance et le développement. (Bonn, 2002).

La circulation de l'eau à l'intérieur du « SPAC » correspond à la circulation dans différents milieux qui se succèdent :

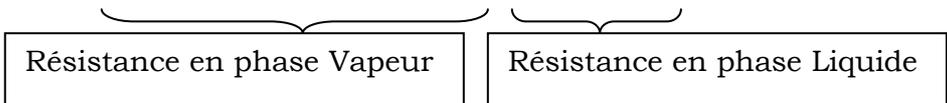
- L'écoulement de l'eau du sol vers les racines.
- L'absorption de l'eau par les racines.
- Le transfert de l'eau des racines vers les parties aériennes par le système conducteur (vaisseaux).
- La diffusion à travers les espaces intercellulaires, et les stomates des feuilles (passage de l'état liquide à l'état vapeur).
- La diffusion de la vapeur d'eau dans l'atmosphère après qu'elle ait traversé la couche limite aérodynamique qui entour la feuille.

Comme, généralement, les quantités d'eau transpirées quotidiennement sont voisines de celles qui sont observées par les racines, le flux d'eau à travers le végétal peut être considéré, à première approximation, comme « Conservatif ». Dans ces conditions, le flux d'eau (ϕ_w) dans le « SPAC » peut être décrit par analogie avec un courant électrique comme le quotient d'une différence de potentiel hydraulique ($d\psi$) par une résistance aux transferts hydrique « R » :

$$\phi_w = \frac{d\psi}{R} \dots\dots\dots(11)$$

Si l'on applique cette équation dans les différentes parties du « SPAC », on fait alors apparaître les résistances alimentaires de chacune des parties :

$$\text{Absorption} = \frac{(\psi_s - \psi_r)}{r(s,r)} = \frac{(\psi_r - \psi_f)}{r_f} = \frac{(\psi_f - \psi_a)}{(r_{st} + r_a)} \dots\dots\dots(12)$$



Où :

ψ_r : Potentiel hydrique des racines.

- $r_{(s,r)}$: Résistance au passage de l'eau du sol aux racines.
- ψ_a : Potentiel hydraulique de la différence de vapeur d'eau de l'air.
- ψ_s : Potentiel hydraulique du sol.
- ψ_f : Potentiel hydraulique des feuilles.
- r_f : Résistance interne de la plante.
- r_{st} : Résistance stomatique.
- r_a : Résistance de l'atmosphère. (Résistance aérodynamique).

Les valeurs des chutes des potentiels qui sont observés dans les différentes parties du SPAC sont les suivantes :

- Sol – Racines : $\psi_s - \psi_r \approx (0.1 - 1)$ MPa.
- Racines – Feuilles : $\psi_r - \psi_f \approx (0.5 - 3)$ MPa.
- Feuilles – Atmosphère : $\psi_f - \psi_a \approx (50 - 100)$ MPa.

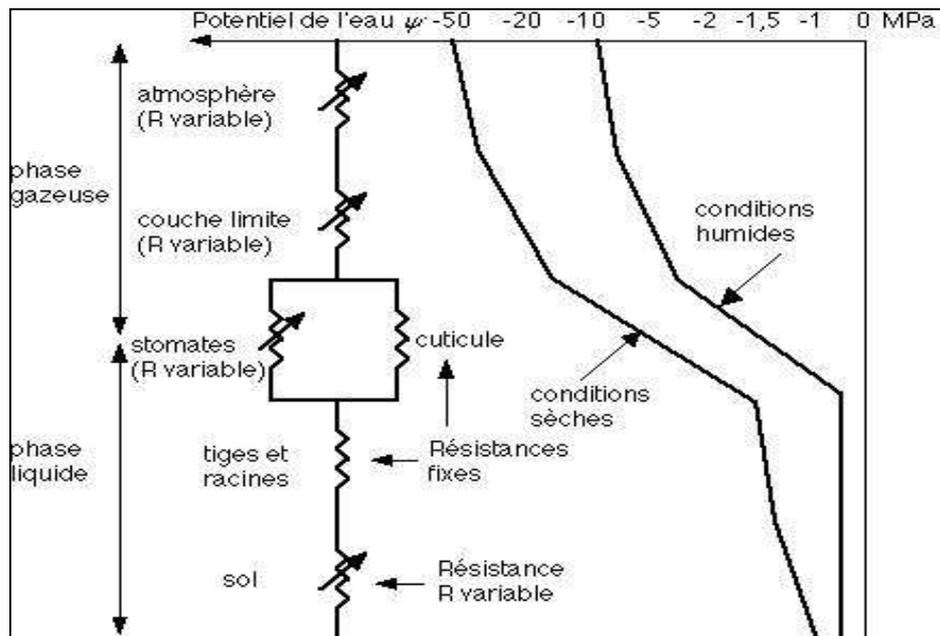


Figure 09 : Evolution du potentiel de l'eau dans le « SPAC » et analogie avec un circuit électrique formé de résistances fixes et de résistances variables. (Bonn, 2002)

Il en résulte, que la somme des résistances en phase gazeuse ($r_{st} + r_a$), c'est-à-dire entre la cavité sous stomatique et l'atmosphère est (50 – 100) fois

supérieure aux résistances qui sont opposées aux transferts de l'eau en phase liquide de la plante. Etant donnée que la résistance stomatique est, en générale, supérieure ou égale à « r_a » (lorsque les stomates se ferment), les stomates constituent un moyen de contrôle extrêmement efficace de la transpiration de la plante. (Humidité relative de l'air en équilibre avec l'eau liée).

Chapitre 2 :
« Modélisation du bilan hydrique à la parcelle »

I.- Définition et principe du bilan hydrique :

Le bilan hydrique est défini comme étant une comparaison entre les réserves, les apports et les pertes en eau d'un système. Il est traduit par l'analyse de la variation de stock d'eau d'un système (ΔS), résultant de la somme algébrique des flux d'eau (Φ) entrant et sortant ; il s'écrit :

$$\Delta S = \sum \Phi_i \dots\dots\dots (13)$$

En agronomie, il s'applique principalement à un sol, ramené à l'unité de surface et de profondeur donnée ; ainsi, le bilan hydrique du sol s'exprime en stock d'eau (m^3 d'eau/ m^2 de sol) ou, en hauteur d'eau exprimée en (mm).

Le bilan hydrique du sol dépend, du climat qui détermine à la fois les apports (P) et les pertes par évaporations du sol et transpiration de la plante. Le suivi de ce bilan donne l'évolution du stock d'eau de la couche de sol exploitée par les racines, qui dépend des propriétés du sol qui modulent la capacité de stockage.

Le bilan hydrique permet donc, essentiellement de définir à chaque instant les réserves disponibles pour les plantes par unité de surface au sol et pour une profondeur donnée. Il permet, également, la détermination des apports par irrigation nécessaires visant à ramener la réserve utile pour les plantes à sa valeur maximale (Larousse Agricole, 2002).

Le principe du « bilan hydrique » se traduit par l'énoncé de la « loi de conservation de la matière » qui stipule que la matière ne peut être ni créée ni détruite, mais qu'elle passe seulement d'un état ou d'un endroit à un autre, ainsi la teneur en eau d'un volume de sol donné ne peut augmenter sans un apports venant de l'extérieur (ex. : infiltration ou remontée capillaire) et ne peut diminuer à moins que l'eau ne soit transportée vers l'atmosphère par évapotranspiration ou en profondeur par drainage (Hillel , 1980).

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 (Urban , 1997).

II.- But du bilan hydrique :

Le bilan hydrique permet de déterminer l'état des réserves en eau du sol, il est alors possible d'estimer l'ETR et son évolution afin de comparer l'état de satisfaction des besoins en eau de la culture.

L'état hydrique des plantes résulte de leur bilan hydrique, c'est en agissant sur les différents termes du bilan hydrique qu'il est possible d'influer sur l'état hydrique, l'arrosage vise à éviter que la dégradation du bilan hydrique n'affecte l'état hydrique au point de pénaliser la production, il s'agit là d'une conception traditionnelle du rôle de l'arrosage (Urban , 1997).

III.- Equation du bilan hydrique :

Dans sa forme la plus simple, le bilan hydrique stipule que dans un volume donné de sol, la différence entre la quantité d'eau ajoutée et la quantité d'eau extraite, au cours d'une certaine période est égale à la variation de la teneur en eau « ΔS » au cours de la même période. L'ensemble des termes composant le bilan sont présentés dans la figure 10 :

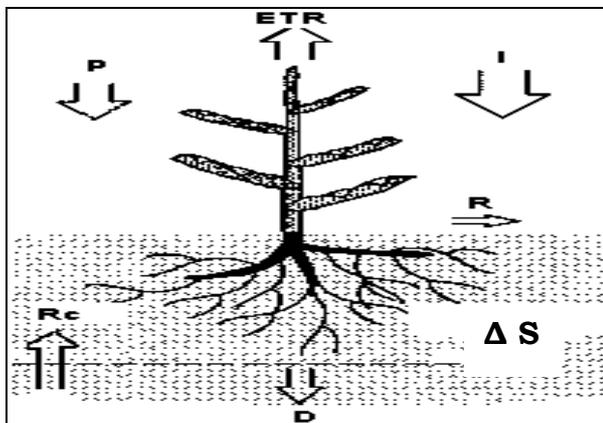


Figure 10 : Schéma du bilan hydrique d'une zone racinaire (Bonn, 2002)

Au niveau de la partie supérieure du système, les apports sont, essentiellement, la pluie « P » et l'irrigation « I », diminuées (ou augmentées suivant les cas) du ruissellement « R » tandis que les pertes se réduisent à l'évapotranspiration réelle « ETR ».

A la limite inférieure, les apports éventuels peuvent être ceux dus à des remontées capillaires « R_c » (en particulier s'il existe une nappe peu profonde) en notant également que des pertes se font par drainage profond « D ».

Dans ce bilan, on néglige les termes de transferts latéraux dans le sol (dans une pente par exemple) pour ne considérer que des transferts verticaux. Le volume de sol sur lequel est fait le bilan est défini par la profondeur du système racinaire. L'équation du bilan hydrique s'écrit donc comme suit :

$$\Delta S = P + I - ETR - D + R_c \pm R \dots\dots\dots(14)$$

Où : « ΔS » est la variation du stock d'eau dans le volume de sol pendant la période considérée.

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

$$\Delta S = P + I - ETR - D \dots\dots\dots(15)$$

Où : « D » représente dans ce bilan un terme résiduel qui permet de ramener le stock d'eau à la « RU », dans le cas où « ΔS » conduirait à dépasser cette valeur ; dans le cas contraire, le terme « D » est nul. Il est difficile d'évaluer la pluie efficace compte tenu des pertes par ruissellement ou par drainage, en se contente, donc, le plus souvent de négliger les faibles pluies et de comptabiliser en pertes les apports qui excèdent la capacité du réservoir sol.

IV.- Evaluation et estimation des termes du bilan hydrique :

Malgré sa simplicité, la résolution du bilan hydrique reste en pratique difficile à appréhender en raison de l'inaccessibilité de certains paramètres.

La composante la plus importante du bilan hydrique, qui est l'évapotranspiration est souvent la plus difficile à mesurer directement. Pour obtenir « ETR » à partir du bilan hydrique, il faut être en possession des mesures précises de tous les autres termes de l'équation (*Hillel, 1980*).

La quantité de pluie ou d'irrigation « $P + I$ » est relativement facile à mesurer, bien qu'il soit nécessaire de prendre en considération une certaine variabilité spatiale de distribution. Le ruissellement « R » est souvent (ou

devrait être) faible sur les terres de cultures, surtout sous irrigation de sorte qu'il est souvent négligeable en comparaison avec les composants principaux du bilan hydrique (*Hillel, 1980*).

De nombreuses formules permettant l'estimation de l'évapotranspiration de référence « ETo », ont été développées depuis les années 40 en fonction des données climatiques disponibles. Les estimations de « l'ETo » étaient, tout d'abord, basées sur des formules empiriques (à partir du rayonnement ou des températures), ensuite elles se sont fondées sur des approches plutôt « physiques ».

Parmi les formules empiriques, on distinguera les méthodes fondées sur le rayonnement (La plus connue est celle de *Jensen (1974)*) et celles fondées sur la température, (formules de *Thorntwaite (1948)*, de *Blaney et Criddle (1950)*). Les formules de « *Penman* » et « *Penman – Monteith* » (1965) ont une base physique et sont fondées sur le bilan de masse.

V.- But de la modélisation du bilan hydrique :

Le bilan hydrique s'avère fortement dépendant des conditions pédo-climatiques. Un recours à la modélisation est donc nécessaire pour pouvoir extrapoler des résultats expérimentaux obtenus dans une situation donnée, et appréhender les risques liés aux aléas climatiques.

Le but de cette modélisation est de gérer la réserve en eau dans la zone racinaire du sol en fonction de la pluie (offre) et de l'évapotranspiration des cultures (demande). Elle 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 (cité par *Delli., 2001*).

VI.- Principe de la modélisation du bilan hydrique :

L'estimation de l'évapotranspiration réelle « ETR » par modélisation du bilan hydrique, demeure un des moyens les plus utilisés pour évaluer la demande eau des cultures à différentes échelles d'espace et de temps. Face à la nécessité d'avoir à gérer un volume d'eau limité, les chercheurs ont été amenés à proposer des modèles qui simulent le développement de la plante et

son utilisation de l'eau, en un compartiment (Module) hydrique et un compartiment croissance et développement (*in Fillali, 2003*)

Le module « Sol » de ces modèles est de complexité variable, il peut reposer sur des bases mécanistes, dans ce cas l'équation de *Richards (1930)* est utilisée pour simuler les transferts d'eau. La complexité d'une telle approche, en outre exigeante en paramètres, trouve une bien meilleure justification pour simuler des phénomènes de type événementiel. Les données utilisées étant conformes (pluie horaire par exemple) à l'usage de l'outil numérique.

Notons toutefois que le modèle d'extraction racinaire repose sur l'analogie électrique (*Antonino, 1992 in Filali., 2003*) ou une réduction « seuillée » de l'ETM (*Feddes, 1978 in Filali 2003*), il demeure hélas encore empreint d'empirisme ; quant au ruissellement « R » il n'est généralement pas pris en compte (*Mailhol, 2001*).

L'intérêt d'utiliser l'équation de Richards est de pouvoir simuler les remontées capillaires. Ce dernier point est le reproche majeur formulé à l'encontre de cette catégorie de modèles dits « capacitifs » (*Mailhol, 2001*).

Les modules « sol » de type capacitif se fondent sur le concept de réservoir, le sol est décomposé en un ou plusieurs réservoirs de capacité fixe ou variable avec le pas de temps. Ce dernier étant généralement journalier, les transferts d'eau en profondeur s'effectuent par débordement successif des différents réservoirs, la capacité maximale d'un réservoir est régie par un paramètre caractérisant le sol à la profondeur considérée, les racines prélèvent l'eau dans le (s) réservoir (s), selon un modèle de répartition pré-défini (*Feddes et al, 1978, cité par Mailhol, 2001*). Ces modèles se distinguent, par ailleurs, dans la façon de traiter le problème relatif aux changements à l'interface avec l'atmosphère notamment concernant l'évaporation du sol.

VII.- Présentation de quelques modèles de simulation du bilan hydrique :

VII.1.- Le modèle de bilan hydrique « BILHYNA » :

BILHYNA est un modèle de bilan hydrique agropédoclimatique journalier. Son fonctionnement est très simple, mais entièrement basé sur des équations physiques robustes. Quelques paramètres sont nécessaires pour définir le sol, la végétation et l'atmosphère, et ces paramètres sont pour la plupart parfaitement connus ou facilement déterminables par des mesures. Les données journalières classiques des stations de mesure météorologiques suffisent à tous les calculs. Chaque terme du bilan hydrique est calculé en un terme journalier découplé, et le bilan de l'ensemble des termes du « bilan hydrique » est calculé une fois par jour et réparti entre les différentes couches de sol.

VII.1.1.- Objectif du modèle Bilhyna :

L'objectif principal du modèle est de simuler le suivi d'une culture en terme de consommation en eau « ETR » et de bilan des réserves hydriques d'un sol sous-jacent, soit pour gérer en temps réel et pronostiquer des interventions culturales comme les irrigations ; soit pour faire des analyses sur de longues périodes (plus de 50 ans) à partir de données passées ou de données futures (scénarios prospectifs).

VII.1.2.- Description du modèle :

a. Paramètres d'entrée du modèle :

a.1.- Le fichier climatique :

Le fichier climatique Bilhyna est un fichier texte contenant une série de 8 colonnes définies comme suit :

- *1^{ère} colonne : Jour*
- *2^{ème} colonne : Mois*
- *3^{ème} colonne : Année*
- *4^{ème} colonne : Température moyenne de l'air (°C)*
- *5^{ème} colonne : Humidité moyenne de l'air (décimale)*
- *6^{ème} colonne : Précipitations (mm)*
- *7^{ème} colonne : Vitesse moyenne du vent (m/s)*
- *8^{ème} colonne : Durée d'insolation (h)*

a.2.- Paramètres liés au sol « Modèle.ini » :

Les paramètres liés au sol, essentiels au fonctionnement du modèle Bilhyna, sont renseignés dans un fichier texte contenant les paramètres suivants :

- Nombre d'horizon dans le sol.
- Nombre de couches dans chaque horizon.
- Les teneurs en eau pondérale :
 - *Humidité en équilibre avec l'air : H_a .*
 - *Humidité minimale : H_{min} .*
 - *Humidité maximale : H_{max} .*
 - *Humidité à capacité au champs : H_c .*
 - *Humidité à saturation : H_{sat} .*
 - *Densité apparente : d_a .*
 - *Paramètres liés à la fonction de pédotransferts (Paramètres de Van Genuchten).*
- *Profil de teneur en eau initial.*
- ... etc.

a.3.- Paramètres liés à la plante « Calendrier Cultural » :

Ce fichier comporte des paramètres très précis pour chaque année tels que :

- *Les caractéristiques de la culture :*
 - *Hauteur maximale de la végétation (m).*
 - *Profondeur maximale des racines (m).*
 - *Indice de surface foliaire maximum « LAI ».*
 - *Cumul des températures (°C) journalières du semis à la récolte.*
 - ... etc.
- *Les interventions culturales :*
 - *Nom de la culture mis en place.*
 - *Période de validité de la culture.*
 - *Date de labour.*
 - *Date de semis.*
 - *Date de récolte.*
 - *Dates et doses d'irrigation.*

b.- Les paramètres de sorties du modèles :

b1.- Le module « Sol » :

Le sol est décliné en une succession de couches verticales de caractéristiques propres et d'épaisseur habituellement croissante selon la profondeur, permettant de définir un profil hétérogène d'humidité du sol. Le système est borné par une humidité minimale « H_{\min} » et maximale « H_c » (correspondant à la capacité au champ). Le sol multicouche surmonte une couche profonde dite « semi infinie » dont l'humidité est constante et fixée *a priori* à la capacité au champ.

L'humidité à la capacité au champ est un paramètre essentiel du modèle BILHYNA, car il permet de calculer le profil d'humidité après une journée de pluie ainsi que le terme de drainage profond.

La valeur de ce paramètre apparaît difficile à estimer. La méthode la plus classique consiste à estimer l'humidité du sol à une valeur de potentiel hydrique « standard » (paramètre purement empirique, généralement de cent à quelques centaines de cm), sur des échantillons de sol en laboratoire ou bien à partir des lois $\theta(\psi)$ (DUCHAUFOR, 1995; CAMPBELL, 1998). Ces données sont imprécises car elles dépendent essentiellement des caractéristiques du sol. Le choix est donc sur une manière plus empirique, qui consiste à mesurer le profil d'humidité du sol après une pluie importante et un ressuyage de 2 à 3 jours sans pluie ni évaporation (en réalisant un Mulch à l'aide d'un film plastique).

b2.- Le module « croissance du végétal » :

Les variables et paramètres définissant le fonctionnement et la croissance du couvert végétal nécessitent une attention particulière. La végétation joue en effet un rôle extrêmement fort sur le bilan hydrique par sa transpiration, et par l'abaissement de l'évaporation de l'eau de la surface du sol. La captation et l'impact des gouttes d'eau de pluie à la surface du sol dépendent également des caractéristiques du couvert (Rosnoblet, 2002).

L'évaporation potentielle « EP » (en mm) est donnée de manière très similaire pour le sol nu et le couvert végétal à partir de la formule de MONTEITH (1965) du sol nu, avec une différence dans les termes de résistance aérodynamique « r_a » (en s.m⁻¹) :

$$EP = \frac{d_j}{L} \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot \left(Rn + \frac{\rho \cdot C_p}{P'} \cdot \frac{P(T_a) - P(T_r)}{r_a} \right) \dots (16)$$

Sol :

$$r_a = r_{asol} = \frac{1}{k^2 \cdot U_a} \text{Log}^2 \left(\frac{Z_r}{Z_0} \right) \dots (17)$$

Végétation :

$$r_a = r_{aveg} = r_{ad} + r_0 \dots (18)$$

$$r_{ad} = \frac{1}{k^2 \cdot U_a} \text{Log} \left(\frac{Z_r - D}{Z_h - D} \right) \cdot \text{Log} \left(\frac{Z_r - D}{Z_{oveg}} \right) \dots (19)$$

$$r_0 = r_{0max} \cdot LAI / LAI_{max} \dots (20)$$

D_j = durée du jour (s)

L = chaleur latente de vaporisation (J.Kg⁻¹)

P' = pente de la courbe de pression de vapeur saturante (Pa.K⁻¹)

γ = constante psychrométrique (Pa.K⁻¹)

Rn = rayonnement net (W.m⁻²)

ρ = densité de l'air (kg.m⁻³)

C_p = chaleur spécifique de l'air à potentiel constant (J.Kg⁻¹.K⁻¹)

k = constante de VON KARMAN (= 0,4)

U_a = vitesse du vent (m.s⁻¹)

Z_r, Z_0, Z_h = hauteur respectivement de référence, de rugosité du sol, du couvert (m)

$P(T_a), P(T_r)$ = pression de vapeur saturante respectivement à la température de l'air et au point de rosée (Pa)

r_{ad} = résistance aérodynamique de diffusion ($s.m^{-1}$)

r_0 = résistance interne de structure de la végétation ($s.m^{-1}$)

Z_{oveg} = rugosité de la végétation (m)

D = hauteur de déplacement nul (m)

r_{0max} = résistance interne maximale de structure de la végétation ($s.m^{-1}$)

LAI = indice du surface foliaire total, vert et sénescents (m^2/m^2)

LAI_{max} = valeur du LAI pour le couvert entièrement développé (m^2/m^2)

Les termes D et Z_{oveg} sont reliés au LAI et à la hauteur de la végétation (Perrier, 1982) :

$$D = Z_h \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{LAI} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{LAI}{2}\right) \right] \right\} \dots\dots\dots (21)$$

Et :

$$Z_{oveg} = Z_h \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{LAI}{2}\right) \right\} \cdot \exp\left(-\frac{LAI}{2}\right) \dots\dots\dots(22)$$

L'évapotranspiration de la culture « ETR » (en mm), est calculée en un terme de transpiration « virtuelle » de la végétation « $ET_{vég}$ » (en mm) (avec la totalité du rayonnement absorbé par la végétation) et d'évaporation « virtuelle » du sol nu « ET_{sol} » (en mm) (avec la totalité du rayonnement absorbé par le sol), les deux étant pondérés par une partition du rayonnement net en fonction d'un coefficient d'extinction dans le couvert végétal « $K_{Rn} = 0.7$ » :

$$ET = (ET_{sol})_{virtuel} \exp(-K_{Rn} \cdot LAI) + (ET_{vég})_{virtuel} \{1 - \exp(-K_{Rn} \cdot LAI)\} \dots (23)$$

Le couvert végétal « vert » est souvent la seule composante de la végétation qui soit modélisée. Les modèles limitent en effet généralement leur étude à la

saison de croissance de la végétation pour des questions de rendement de la culture, tandis que dans le modèle Bilhyna vise à modéliser le bilan hydrique en continu, notamment pour préciser le terme de drainage profond. Or, durant son évolution, le couvert végétal se rencontre également sous la forme d'un couvert sénéscent sur pied, puis d'un mulch de pailles résultant de la récolte. Bien que seules les surfaces foliaires vertes doivent être considérées pour calculer la transpiration de la végétation, l'ensemble des états de la végétation doit être pris en compte pour calculer les caractéristiques aérodynamiques de la culture, l'évaporation de l'eau à la surface du sol et la captation de l'eau de pluie.

L'évolution du « LAI » est calculée avec un pas de temps journalier à partir d'un simple modèle de lissage entre les valeurs moyennes mesurées. En l'absence de mesures, BILHYNA permet de simuler l'évolution du « LAI » à partir d'un modèle simple de sommes de degrés jour et d'une date donnée de semis.

Le taux de recouvrement du sol par la végétation est un paramètre important pour la captation et pour le calcul de l'énergie cinétique de la pluie à la surface du sol.

b3.- Le module « Ruissellement / Infiltration » :

Les études ayant porté sur l'infiltration constituent une base de données énorme. Les études les plus récentes rapportent des résultats fort intéressants et pour lesquels nous avons pu juger une bonne cohérence entre la plupart des auteurs. On est désormais en mesure de prévoir assez raisonnablement selon les grandes classes de sols des données primordiales telles que : l'ordre de grandeur des paramètres effectifs moyens d'infiltration (essentiellement la valeur de la conductivité hydraulique à saturation, prenant en compte un certain poids de la croûte de battance), des coefficients d'action du couvert végétal sur l'infiltration et le ruissellement, des coefficients moyens de ruissellement de l'eau de pluie, etc. Toutefois, une nette variabilité spatiale et temporelle entoure ces différents termes, obtenus généralement à partir d'approches simplifiées et de haut degré d'empirisme.

La diminution des erreurs dans le calcul de l'infiltration et du ruissellement, et le développement des possibilités d'extrapolation raisonnée pour différents types de sols, nécessite ainsi de prendre en compte un certain nombre de facteurs avec plus de réalisme physique. Ceux-ci sont apparemment bien connus : stratification du sol en différentes couches de caractéristiques hydrodynamiques différentes, type de couvert végétal sur pied et en résidus à la surface du sol (diminution de l'agressivité des pluies, infiltration favorisée à la base de tiges par « stemflow », augmentation de la perméabilité du sol par les tiges et les racines, diminution de l'infiltrabilité par les résidus de récolte), croûte de battance, type de travail du sol, macropores d'origine biologique, fissuration sous l'effet du gonflement/retrait du sol, présence de chemins préférentiels de ruissellement, tassement de la surface du sol par les roues des engins agricoles, etc. (Rosnoblet, 2002)

Le modèle d'infiltration permet de déterminer à chaque instant une quantité de défaut d'infiltration qui constitue un ruissellement « potentiel », Le ruissellement est en réalité un mécanisme dynamique complexe qui dépend largement de la rugosité de la surface du sol.

Lorsqu'on considère un élément de surface de sol donné, le flaquage se déroule selon trois phases chronologiques distinctes Tout d'abord, le flaquage débute sans ruissellement. Ensuite, le volume flaqué augmente et un ruissellement se crée, qui se matérialise par l'augmentation de la connectivité entre les flaques voisines. Le ruissellement est alors partagé entre des redistributions locales, et une partie quittant effectivement la parcelle. En dernière phase, le flaquage est à sa valeur maximale et toute l'eau en excès ruisselle et peut quitter la parcelle. Les échelles spatiale et temporelle jouent un rôle important dans le processus. (Rosnoblet, 2002)

La figure 11 nous montre les deux principales phases du ruissellement :

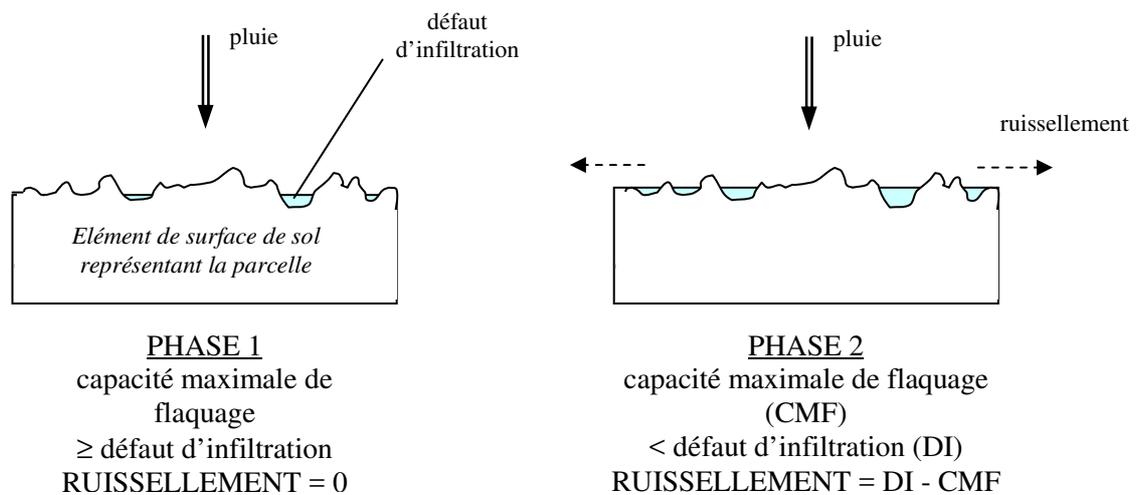


Figure 11 : Schéma de modélisation du ruissellement en deux phases
(Rosnoblet, 2002)

b4.- Module Infiltration, drainage profond et remontées capillaires :

Les apports d'eau journaliers sont incorporés par un processus d'infiltration ultra - simplifié : les couches de sol sont rechargées à la capacité au champ, successivement de la surface vers la profondeur, avec en premier la disparition éventuelle du mulch ; l'eau en excès constitue le terme de drainage profond.

Un terme correctif simule la redistribution lente des transferts d'eau entre couches de sol, à l'aide d'un coefficient d'échange constant. Ce coefficient d'échange est appliqué successivement à chaque inter- couches de la profondeur vers la surface ; sont alors donnés le cas échéant un terme de remontées capillaires ou un terme secondaire de drainage.

b5.- Le module « Captation » et « couplage de la captation avec l'Infiltration / Ruissellement » :

b5.1.- Module Captation :

La captation (schématisée sur la figure12) - processus également appelé « interception » - détourne une partie de l'eau de pluie avant qu'elle n'atteigne le sol, par un phénomène de rétention et d'évaporation au niveau des surfaces végétales aériennes (feuilles, tiges, fleurs, fruits). Précisons que toute l'eau atteignant une surface végétale avant le sol ne constitue pas la captation, puisqu'une partie parvient au sol par égouttage depuis les feuilles et coulant le long des tiges (processus nommé « stemflow »). Cette eau présente sur les surfaces végétales est soumise à la demande climatique (évaporation potentielle). Il existe donc un stock d'eau sur les surfaces végétales, qui varie selon des apports par la pluie et des pertes par évaporation et par égouttage ou stemflow. (Rosnoble, 2002)

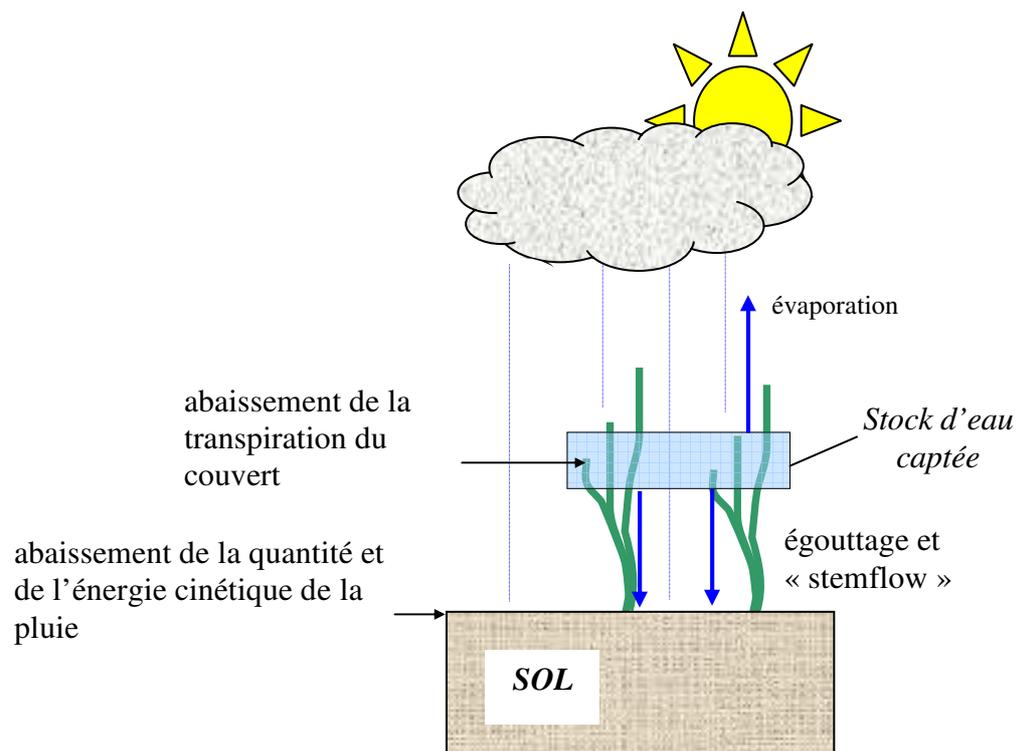


Figure12 : Schéma simplifié de la captation sur une culture
(Rosnoble, 2002)

Chaque couvert végétal peut être caractérisé par une capacité propre de rétention d'eau par les surfaces végétales, que l'on peut exprimer en (mm) d'eau par unité de surface de sol. Cette valeur dépend d'un grand nombre de

paramètres, fonction à la fois des caractéristiques du végétal et de certains facteurs météorologiques (BLAKE, 1975) :

- Le stade de développement du peuplement : « LAI », la structure morphologique du végétal, le profil de distribution des surfaces foliaires...etc.
- La quantité de pluie, l'énergie cinétique des gouttes de pluie, les turbulences atmosphériques qui déterminent notamment un égouttage plus ou moins fort des surfaces, la viscosité de l'eau, et la demande évaporative de l'atmosphère.

L'évaporation potentielle du stock d'eau captée est largement déterminée par la pénétration du vent dans le couvert, qui est elle-même fonction du type de peuplement (Rosnoblet, 2002).

Parallèlement à l'abaissement de la quantité d'eau de pluie arrivant au niveau du sol, la captation a également pour effet de diminuer la transpiration du couvert végétal (RUTTER, 1975; MAHFOUF et JACQUEMIN, 1989; in Rosnoblet, 2002), en bloquant le fonctionnement des stomates : la transpiration est donc inférieure pour un couvert mouillé que sec. Le calcul de l'évapotranspiration d'un couvert mouillé est toutefois difficile, à cause de l'hétérogénéité du mouillage sur les surfaces végétales, dans le temps et dans l'espace, dictée notamment par l'hétérogénéité de l'évaporation dans le couvert. Néanmoins, la captation implique deux phénomènes ayant des effets inverses sur le bilan hydrique. La question du bilan de la captation est alors posée : le processus de captation représente-t-il une perte d'eau pour la culture ?

Pour calculer le poids de la captation sur le bilan hydrique, il faut distinguer entre plusieurs termes essentiels : le stock d'eau captée (quantité d'eau présente sur le feuillage à un moment donné), la quantité de captation (« captation », somme des quantités de pluie retenues par le feuillage et évaporées), la quantité d'eau non transpirée par le couvert à cause du processus de mouillage des feuilles « ΔETR », et le bilan de la captation (« bilan », quantité de captation diminuée de l'abaissement de la transpiration du couvert). Le bilan de la captation peut donc être exprimé comme suit (tous termes exprimés en mm) (Rosnoblet, 2002):

$$\boxed{\text{bilan} = \text{captation} - \Delta ETR} \dots\dots\dots (24)$$

Les éléments précédents ont suggéré à certains auteurs de définir un terme de transpiration relative, qui est le rapport de l'évapotranspiration du « couvert sec » (soit ET) sur celle du « couvert mouillé » (ce dernier terme est simplement la valeur de l'évaporation potentielle de l'eau captée : EP) (MONTEITH, 1965b, cité par RUTTER, 1975 in Rosnoblet, 2002) :

$$\boxed{\alpha = ET/EP} \dots\dots\dots (25)$$

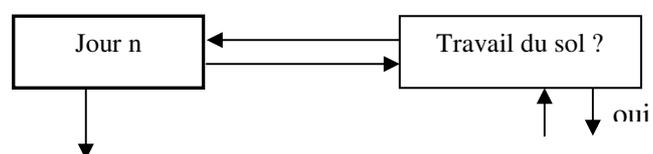
On peut ainsi affirmer que le bilan de la captation sera toujours positif, puisque l'évaporation potentielle dans le couvert est nécessairement supérieure à la transpiration du couvert, tout particulièrement sur un couvert sénescant ou présentant une régulation stomatique. (Rosnoblet, 2002)

b5.2.- Module « couplage de la captation avec Infiltration / Ruissellement :

Le schéma de couplage général des différents sous - modèles au sein de BILHYNA est présenté par la figure ci - dessous montrant l'agencement des différents modèles autour de BILHYNA (cases représentées en grisé pour les éléments de ce dernier). Le modèle BILHYNA effectue pour sa part le bilan hydrique journalier, à partir des différents termes journaliers. Un certain nombre de variables et paramètres sont ainsi introduits comme donnée d'entrée journalière, notamment les caractéristiques du couvert végétal « LAI » et le profil d'humidité initiale du sol.

L'intensité de la pluie, la captation et l'infiltration / ruissellement sont calculés selon un pas de temps fin commun et ajustable, inférieur à une minute. Le profil d'humidité du sol utilisé pour calculer l'infiltration / ruissellement est initialisé journalièrement par BILHYNA, mais géré de manière fine sur la journée en fonction des phases successives d'infiltration de l'eau de pluie et de redistribution de l'eau infiltrée entre deux pluies. Le profil d'humidité pour le jour suivant est néanmoins calculé par BILHYNA selon son schéma simple, le modèle d'infiltration / ruissellement ne faisant

qu'abaisser la quantité de pluie journalière en fonction de la valeur du cumul journalier de ruissellement. Le stock d'eau capté par la végétation de même que la hauteur de flaquage sont gérés de manière continue, et les quantités restantes à la fin d'une journée sont utilisées comme donnée initiale au début de la journée suivante.



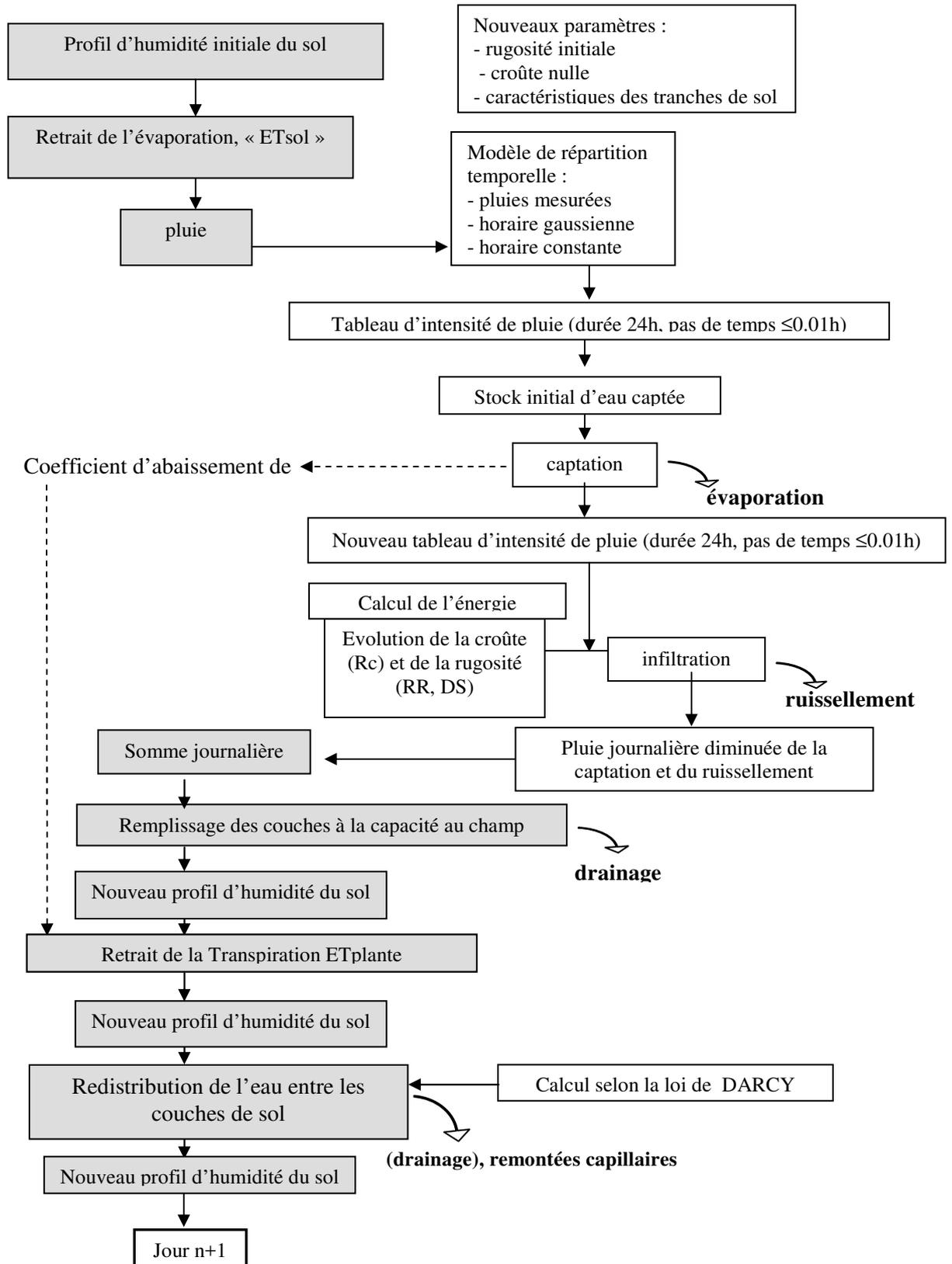


Figure 13 : Organigramme simplifié du couplage de l'ensemble des modèles au sein de BILHYNA

L'évaporation de la surface du sol est gérée avec la formation d'un mulch selon un modèle semi-empirique (PERRIER, 1973). L'évaporation journalière du sol, « $ET_{sol,j}$ » (en mm), équivaut après une pluie à l'évaporation potentielle. A mesure de l'évaporation, il se forme une couche de sol sec « mulch » (d'humidité équivalente à celle de l'air) qui réduit le taux d'évaporation (figure 14) :

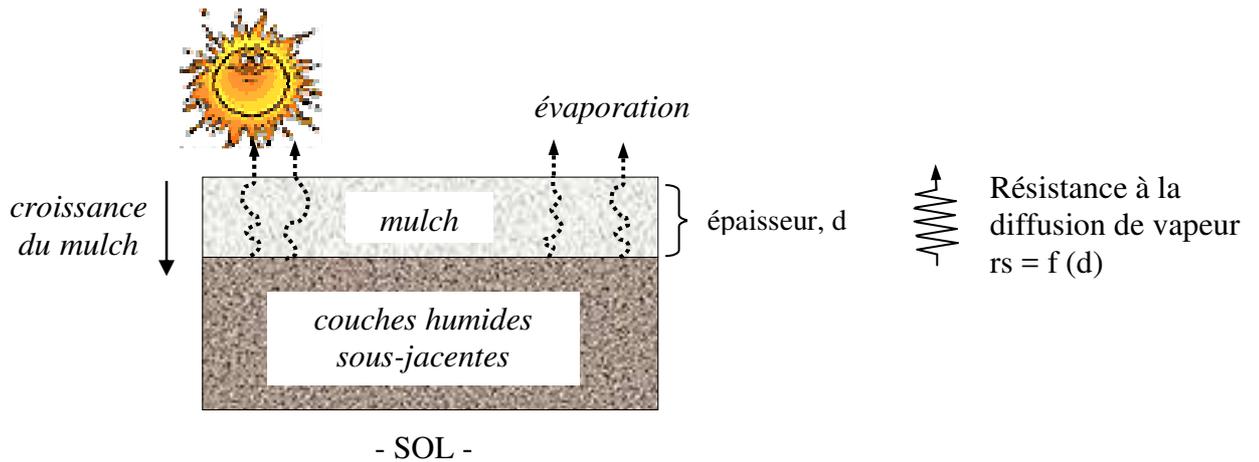


Figure 14 : Schéma simplifié du fonctionnement du modèle de Mulch (Rosnoblet, 2002)

$$ET_{sol} = \frac{EP}{1 + \frac{\gamma}{P + \gamma} \cdot \frac{r_s}{r_{asol}}} \dots\dots\dots (26)$$

Avec :

$$r_s = d \cdot \alpha$$

$$\alpha = \frac{t}{D_v} \text{ et}$$

r_s = résistance de diffusion du sol ($s \cdot m^{-1}$)

r_{asol} = résistance aérodynamique du sol ($s \cdot m^{-1}$)

d = épaisseur du mulch (m)

t = coefficient de tortuosité

D_v = coefficient de diffusivité de la vapeur d'eau

L'équation d'évaporation du sol est ainsi donnée par :

$$\sum_0^t ET_{sol,t} = \bar{A}_n \left(\sqrt{\frac{2 \cdot \sum_0^t EP_t}{\bar{A}_n} + 1} - 1 \right) \dots\dots\dots (27)$$

\bar{A} étant une constante :

$$\bar{A}_n = \frac{1}{n} \cdot \sum_0^n A_i \dots\dots\dots (28)$$

Et :

$$\bar{A}_i = \frac{\gamma}{P'+\gamma} \cdot \rho_{sol} \cdot (H_c - H_a) \cdot \frac{D_v}{\alpha} \cdot r_{asol} \dots\dots\dots (29)$$

La résolution est journalière et le mulch est limité à la première couche de sol. L'évolution de l'épaisseur du mulch est fonction de l'humidité initiale de cette couche de surface du sol.

La transpiration du couvert végétal est calculée en fonction la transpiration potentielle, et de la disponibilité en eau du sol (fonction du profil de densité racinaire) afin de donner un poids à la régulation stomatique. Les valeurs de « LAI » doivent être forcées à partir de mesures, et les valeurs intermédiaires sont interpolées en fonction de la courbe de sommes de degrés jour. La hauteur de la végétation « Zh », est reliée à la valeur du « LAI » :

$$Zh = Zh_{max} \cdot \frac{LAI}{LAI_{max}} \dots\dots\dots (30)$$

Avec : Zh_{max} , et LAI_{max} valeurs pour le couvert à maturité.

L'appareil racinaire croît de manière symétrique à l'appareil aérien, jusqu'à une profondeur maximale d'enracinement. La régulation stomatique de la transpiration est intégrée à travers un coefficient « a_0 » (Figure 15).

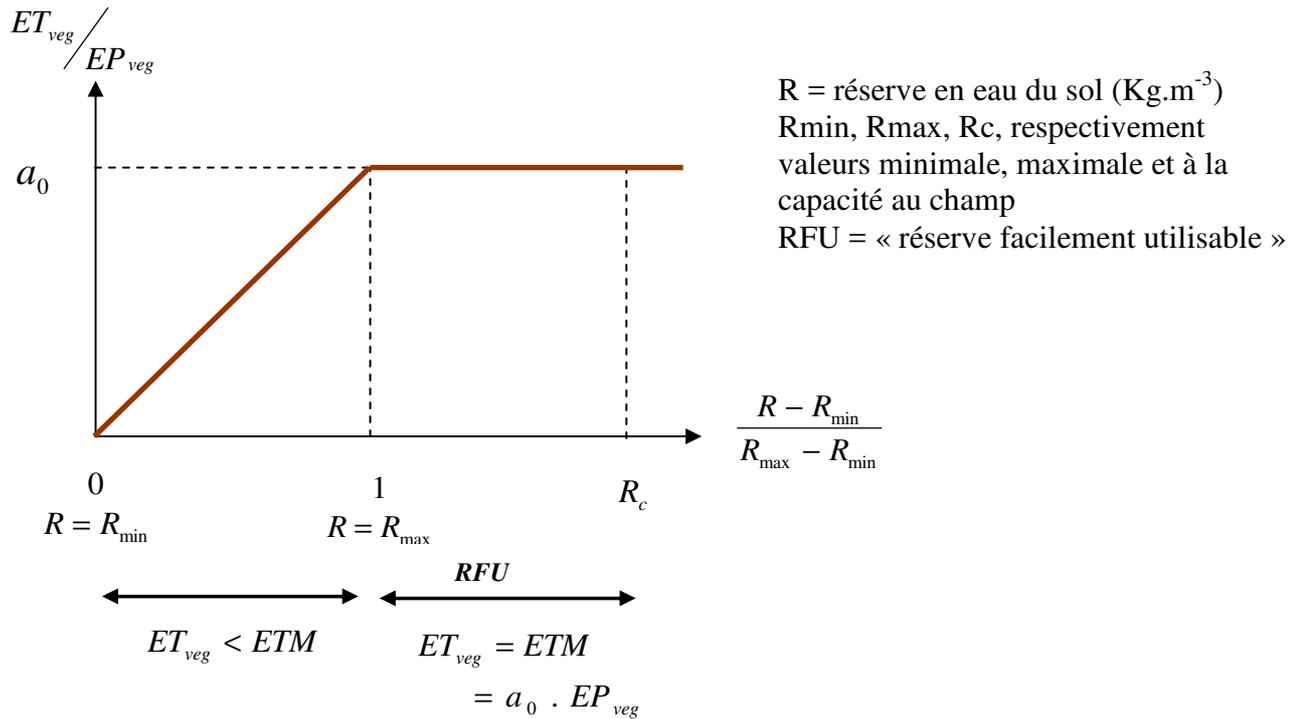


Figure 15 : Schéma de pondération de la transpiration potentielle de la végétation (ET_{veg}) en fonction de l'humidité du sol (Rosnoble, 2002)

$$a_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_0^n \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{P + \gamma} \cdot \frac{r_{s \min}}{r_{\text{aveg}} \cdot LAI}} \dots \dots \dots (31)$$

Avec :

$r_{s \min}$ = résistance stomatique minimale (s.m^{-1})

r_{aveg} = résistance aérodynamique du couvert (s.m^{-1})

L'évaporation journalière (mm) s'écrit :

$$\sum_0^t ET_{\text{veg},j} = (R_{\text{initiale}} - R_{\min}) \cdot \left(1 - \exp \left(- \frac{\overline{a_0}}{R_{\max} - R_{\min}} \cdot \sum_0^j EP_{\text{veg},j} \right) \right) \dots \dots \dots (32)$$

Ce terme est prélevé dans chaque couche de sol proportionnellement à la densité racinaire. La décroissance du rapport de la transpiration sur la

transpiration maximale entre R_{\max} et R_{\min} est critiquable dans sa forme linéaire. Ce modèle simple est néanmoins gardé en approche moyenne.

Le mulch de paille subsiste à la surface du sol jusqu'au travail suivant du sol. Le calcul de son impact sur l'abaissement de l'évaporation de l'eau à la surface du sol se fait par un simple coefficient de partition du rayonnement solaire :

$$ET_{sol} = (ET_{sol})_{virtuel} \cdot \exp(-K.LAI) \dots\dots\dots(33)$$

$(ET_{sol})_{virtuel}$: évaporation journalière du sol en l'absence de couvert végétal (mm)

K : Coefficient d'extinction du rayonnement intégré pour une journée = 0.7

b7.- Le « Bilan Hydrique » :

L'évolution journalière du stock d'eau sol « ΔR_s » (en mm), est la somme des termes d'évapotranspiration « ET », des apports d'eau de pluie « P » et d'irrigation « I », du drainage « D », des remontées capillaires « Rem » :

$$\Delta R_s(t) = \{P(t) + I(t)\} - D(t) + Rem(t) - \sum_0^t ET(t) \dots\dots\dots (34)$$

Une hypothèse majeure du modèle est que le découplage des processus n'impose en moyenne pas d'erreurs, le système étant parfaitement borné par des teneurs en eau maximales et minimales du sol.

VII.2.- Le modèle de bilan hydrique « Pilote » :

Ce modèle permet de déceler la date d'application du stress hydrique. C'est un modèle de bilan hydrique et de rendement basé sur la simulation de l'indice foliaire « LAI ». Il a été conçu pour répondre uniquement à la problématique relevant de l'usage de l'eau, initié sur le cas de Sorgho et du Tournesol (Mailhol et al., 1997).

Ce modèle a été également étendu à d'autres cultures comme le Maïs (Mailhol et Ruelle, 1999). L'adaptation et l'application du modèle au cas du Blé dur en Tunisie sur deux parcelles expérimentales au climat et au sol contrastés, soulignent le caractère à la fois robuste et opérationnel de l'outil

propre à identifier des stratégies d'irrigation. L'intérêt du modèle « Pilote » est de proposer un niveau de production pour une stratégie d'apport d'eau et ce, avec des exigences limitées en ce qui concerne les paramètres et les variables d'entrées, aspect à prendre en compte lorsque l'accessibilité à certaines données s'avère difficile.

Le modèle simule l'indice foliaire « LAI » à partir des sommes de températures dans la base. La fonction permettant cela nécessite six paramètres dont quatre paramètres de forme devant faire l'objet d'un ajustement. Les deux autres paramètres, le premier est la somme des températures pour obtenir le « LAI max. » ; il correspond au cumul de température requis au stade Floraison et peut être accessible dans la littérature. Le deuxième doit faire l'objet d'un Calage.

Le modèle « Pilote » est écrit en FORTRAN, il est compatible PC, fonctionne sous MS-DOS et nécessite l'usage d'un écran couleur pour un éventuel affichage graphique (évolution des réserves).

Outre la simulation d'une chronique relative à une ou plusieurs années climatiques avec calcul du rapport « ETR/ETM » sur une période choisie avec utilisation éventuelle du module « Rendement » ; le logiciel permet le Pilotage au jour le jour des arrosages avec une gestion automatique du Fichier de données (facilité de prise en compte d'une prévision à « n » jours) (*Mailhol, Ruelle, Revol, 1996*).

a.- Les paramètres d'entrée du modèle :

a1.- Le fichier climatique :

Le fichier climatique Pilote est un fichier texte contenant une série de 9 colonnes définies comme suit :

- *1^{ère} colonne : Année*
- *2^{ème} colonne : Mois*
- *3^{ème} colonne : Jour*
- *4^{ème} colonne : Jour Julien*
- *5^{ème} colonne : Température moyenne de l'air (°C)*
- *6^{ème} colonne : Humidité moyenne de l'air (%)*
- *7^{ème} colonne : Durée d'insolation (h/j) ou Rayonnement Global (J/cm²)*

- 8^{ème} colonne : Vitesse moyenne du vent (m/s)
- 9^{ème} colonne : Précipitations (mm)

a2.- Paramètres liés au sol :

Le fichier « Paramètres d'initialisation » du modèle Pilote doit comporter les paramètres suivants :

- *Nom de la culture utilisée.*
- *Date début simulation.*
- *Date fin simulation.*
- *Humidité à capacité au champs.*
- *Humidité au point de flétrissement.*
- *Stock hydrique initial (mm).*
- *Date de semis.*
- *Date de récolte.*

a3.- Paramètre liés à la plante :

Les paramètres les plus importants liés à la plante que l'on doit renseigner dans le fichier paramètres plante de Pilote sont :

- La profondeur racinaire maximale (m).
- L'accroissement racinaire (m/j).
- Durée d'installation du système racinaire.
- Température de maturité.
- L'indice foliaire maximal.
- ... etc.

La figure 16 ci – dessous illustre le principe de fonctionnement du modèle Pilote :

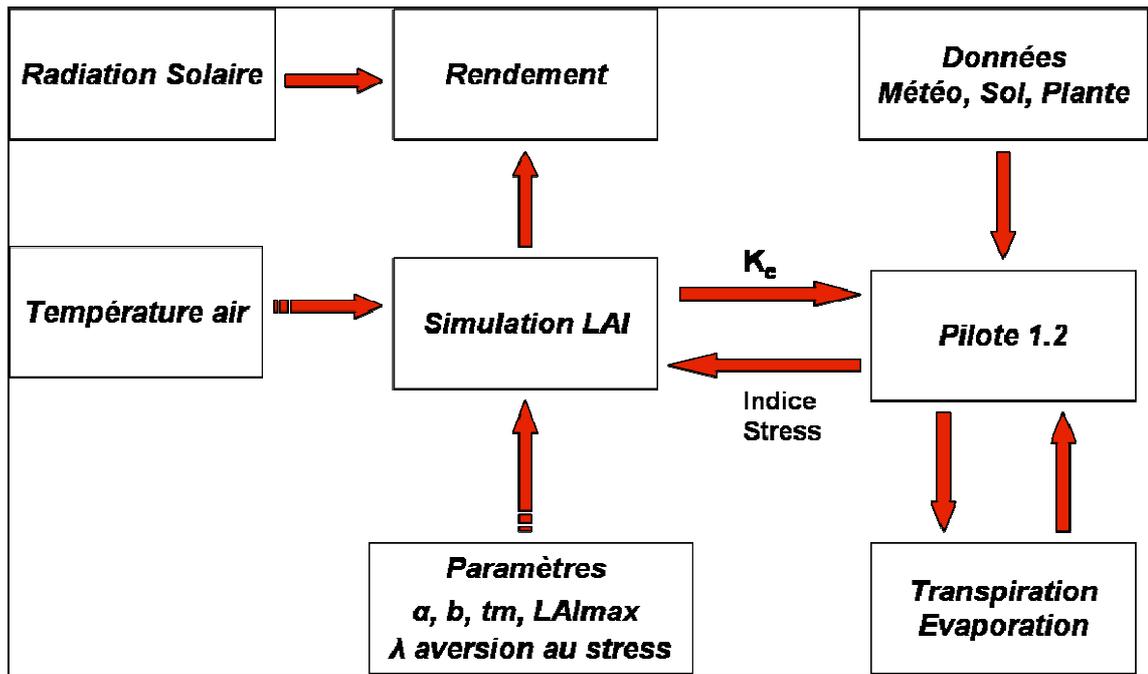


Figure 16 : Principe de fonctionnement du modèle Pilote
(Mailhol, Ruelle, 1998)

b.- Les paramètres de sortie du modèle :

b.1.- Le module sol :

Le modèle « Pilote » régit les transferts d'eau au pas de temps journalier (j) au moyen de trois réservoirs, le paramètre fondamental de ce modèle est la réserve utile exprimée en (mm/m) définie comme la différence entre le stock en eau du sol à la capacité au champ « CC » (CC : état du sol après arrêt du drainage) et le stock en eau au point de flétrissement permanent « Pfp » (Pfp : correspond au stade à partir duquel l'eau n'est plus extractible par la plante). (Figure 17)

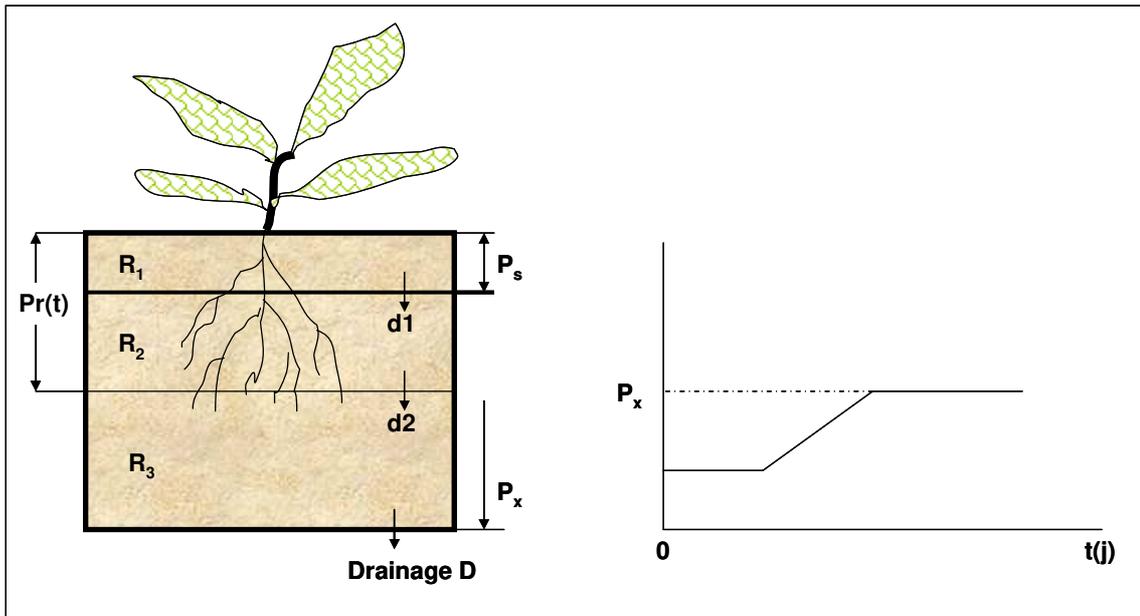


Figure 17 : Schéma de fonctionnement du modèle PILOTE
 (Mailhol, 2001)

Un réservoir superficiel « R1 » à profondeur fixe « Ps » (Ps = 0,1m) gère l'évapotranspiration après un apport d'eau. Il a une capacité maximale :

$$\dots\dots\dots(35)$$

$$R_{1max.} = RU \cdot P_s$$

Ce paramètre « Ps » peut être calibré indépendamment des autres compartiments du modèle.

Le réservoir superficiel alimente par drainage « d1 » le réservoir sous-jacent « R2 » évolutif avec l'enracinement dont la profondeur est simulée selon l'expression :

$$d1(j) = \text{Max.}\{0 ; R1(j) - R1max.\} \dots\dots\dots(36)$$

$$Pr(j) = Pr(j-1) + Vr \dots\dots\dots(37)$$

Où : Vr est la croissance racinaire en m/j

L'enracinement peut atteindre la profondeur maximale « Px ». Le paramètre « Px » est une caractéristique propre de la culture dans l'hypothèse où le

contexte de sol n'impose pas de limitation physique à l'enracinement (exemple : Enrochement, nappe, couche très compactée...etc).

La croissance racinaire est de type linéaire au delà d'une période de mise en place du système racinaire fixée à 15 jours pour les cultures d'été (Maïs, Soja, Sorgho, Tournesol) et à un mois pour le Blé. Durant cette période de mise en place, les racines exploitent une profondeur de sol maximale de (0,3m). Au delà de cette période, l'enracinement évolue de façon linéaire de (0,3m) à « P_x ».

La progression de l'enracinement peut être stoppée lorsque la teneur en eau du réservoir racinaire passe en dessous d'un certain seuil exprimé en (%) de la « RU ». Lorsque les conditions de la teneur en eau le permettent, l'enracinement peut se poursuivre à condition de n'avoir pas atteint le début de sénescence. Ce paramètre seuil n'est pas facile à caler sous nos conditions climatiques.

Une valeur de 20 % de la « RU » peut être proposée sur la base de simulations effectuées sur le cas du Blé dur en Tunisie (*Mailhol et al, 2000*), où il est assez fréquent que les pluies de la saison (i) n'assurent pas la recharge en profondeur du profil asséché durant la saison (i - 1).

A chaque pas de temps le réservoir « R₂ » s'accroît de la valeur « θV_r », où : « V_r » est la vitesse de progression racinaire (m/j) et « θ » (mm/m) la teneur en eau de la couche sous le Front racinaire. La valeur de « θ » dépend des positions respectives (calculées à chaque pas de temps) des deux Fronts :

- Le Front saturé (à la capacité au champ) :

$$P_{cr}(j) = P_{cr}(j-1) + d1(j) / (RU - \theta_{ini}.) \dots\dots\dots(38)$$

- Le Front racinaire.

La valeur prise par « θ » est soit « θ_{ini.} » (mm/m), stock initial, ce qui signifie que le drainage n'a pas rechargé les couches en deçà du Front racinaire, soit la valeur de « RU » ce qui signifie que le drainage « D » est quant à lui calculé selon :

$$D = \text{Max.} \{ 0 ; R_{3max.} - R_3 \} \dots\dots\dots(39)$$

Où :

$$R_{3\max.} = RU \{ P_x - Pr(j) \} \dots\dots\dots(40)$$

On suppose que l'ETR = ETM tant que le premier réservoir contient de l'eau. Le calcul de l'ETR est fondé sur la réduction linéaire de l'ETR en fonction de la teneur en eau de « R₂ ». La réduction prend effet lorsque cette teneur en eau « R₂ » passe en dessous de la valeur seuil Rs(t) définie selon :

$$R_s(t) = (1 - K_{ru}) \cdot Pr(j) \cdot RU \dots\dots\dots(41)$$

Où : « K_{ru} » le paramètre de *Doorenbos et Kassam (1979)*, et qui est égale au rapport (RFU/RU). L'ETM = K_c * E_{T0}, où « K_c » est le coefficient cultural et « E_{T0} » l'évaporation de référence obtenue par la formule de *PENMAN (1948)*.

b.2.- Le module « Croissance du végétal » :

L'indice foliaire « LAI », est un témoin visible des potentialités productives (quantité de matière sèche) de la plante au cours de sa croissance.

Un stress hydrique momentané induit chez certaines cultures, comme le Maïs ou le Sorgho, un enroulement des feuilles (*Olufayo, 1994*), ou un arrêt de son évolution.

Celle-ci est peut être décelée lorsque l'on réalise un suivi au moyen d'un appareillage adapté tel que le « Picqhélios », qui mesure le rayonnement intercepté. La prédiction fiable du rendement requiert nécessairement une simulation satisfaisante du « LAI ».

Le modèle Pilote simule les effets du stress hydrique sur l'indice foliaire. On suppose en outre que tous les facteurs de production autres que l'eau sont à leur optimum. La formulation adoptée pour le « LAI » intègre la disponibilité en eau pour la plante par le biais d'un indice de stress fonction de l'évapotranspiration relative. Le « LAI » croît lorsqu'à un certain seuil d'indice thermique « TT(j) » est dépassé. Ce seuil correspond à la température de Levée. Pour la plupart des grandes cultures, il est fixé à 100°C jours. L'indice thermique est calculé selon l'expression :

$$TT_{(j)} = \sum_{k=1}^{k=j} (T_{moy} - T_b) \dots\dots\dots(42)$$

Où : « T_{moy.} » : Est la température moyenne journalière et « T_b » la température de base (6°C pour la plupart des grandes cultures).

Le calage du « LAI » est réalisé selon l'expression suivante :

$$LAI_{(j)} = LAI_{max} \left[\left(\frac{\sum_{k=1}^j TT - ts}{t_m} \right)^\beta \exp \left\{ \frac{\beta}{\alpha} \left(1 - \left(\frac{\sum_{k=1}^j TT - ts}{ts} \right)^\alpha \right) \right\} - (1 - stress^\lambda) \right] \dots (43)$$

Où :

« LAI_{max.} » : Est la valeur maximale du « LAI » pour une culture croissant sous des conditions non limitantes (déductible de la littérature ou par la mesure).

Les paramètres « α » et « β » sont des paramètres de calage. Le paramètre « t_m » représente la somme des températures nécessaires pour atteindre le « LAI_{max.} ». Sa valeur pour la plupart des cultures, et en particulier pour le Maïs, correspond au cumul de températures entre Semis et Floraison.

Le paramètre « α » permet à la fois de simuler croissance et sénescence. Le modèle assure le passage de α = α₁ à α = α₂, lorsque « TT » dépasse « t_m ». On a donc en fait trois paramètres à caler, le dernier « α₂ », pouvant l'être séparément de « α₁ » et de « β ». Une valeur faible de « α₂ » (α₂ < α₁/30) permet par exemple de simuler une sénescence lente (cas du Maïs).

Une procédure de calage automatique a été développée à cet effet. Le paramètre « λ » est un paramètre empirique traduisant l'aversion de la plante au stress hydrique. La pratique du modèle tend à montrer qu'une valeur constante de (1,25) pour « λ » peut être adoptée indépendamment du type de culture. L'indice de stress est formulé selon l'expression :

$$stress = \frac{\sum_{j=10}^j Tp}{\sum_{j=10}^j Tpm} \dots\dots\dots(44)$$

Où :

T_p est la transpiration réelle

T_{pm} est la transpiration maximale.

$$T_{pm(j)} = C_p \cdot K_c \cdot E_{to} \dots\dots\dots(45)$$

$$C_p(j) = [1 - \exp(-0.7 LAI)] \dots\dots\dots(46)$$

Avec pour facteur « C_p », assurant le partage entre évaporation et transpiration.

Et :

$$K_c(j) = K_{cmax} (1 - \exp(- LAI(j))) \dots\dots\dots(47)$$

« K_{cmax} . » étant la valeur maximale possible du coefficient cultural pouvant être obtenu dans la littérature, lorsque les conditions d'advection ne sont pas trop importantes (ex. $K_{cmax} = 1,2$ pour le Maïs et le Blé).

Contrairement aux précédentes versions (Pilote version 1.2), les « K_c » sont directement obtenus à partir de la simulation du « LAI ». Ils sont de ce fait adaptés aux conditions environnementales.

L'évaporation du sol affecte le premier réservoir selon l'expression :

$$E_{sol} = (1 - C_p) \cdot E_{to} \dots\dots\dots(48)$$

En l'absence de culture, ce premier réservoir est donc soumis à « E_{to} » jusqu'à épuisement. Lorsqu'il en est ainsi les couches sous jacents s'épuisent beaucoup plus lentement selon ($K_{snu} \cdot E_{to}$), « K_{snu} » pouvant décroître (selon une exponentielle) en fonction de la teneur en eau de « R_2 » depuis « K_{smax} . » (fixé à 0,3) jusqu'à 0. Le réservoir superficiel protège en quelque sorte les couches profondes vis à vis de l'évaporation.

En présence de culture c'est le premier réservoir qui est sollicité par la plante. Le reste pour satisfaire « T_{pm} » est prélevé dans « R_2 ».

Le modèle calcule le rendement final « Y_a » en grain selon l'expression suivante :

$$Y_a = Y_m \text{ Min} \left\{ 1 ; LAI_{\text{moy.}} / LAI_{\text{opt.}} \right\} \dots\dots\dots(49)$$

Où :

Y_m est le rendement en conditions non limitantes en eau.

$LAI_{\text{moy.}}$ est calculé durant une période critique (liée à l'impact du stress hydrique sur le rendement) dont les bornes correspondent à des stades phénologiques définis en somme de température (t_{s1} , t_{s2}).

$$LAI_{\text{moy}} = 1/N_j \sum_{t_{s1}}^{t_{s2}} LAI(j) \dots\dots\dots(50)$$

N_j : nombre de jour

« $LAI_{\text{opt.}}$ » est la valeur optimale que doit avoir le « LAI » durant cette même période critique pour obtenir le rendement maximum. Pour la plupart des cultures, hormis le Tournesol qui à la réputation de mal valoriser l'eau, la valeur de « $LAI_{\text{opt.}}$ » est de l'ordre de 90% du « $LAI_{\text{max.}}$ », mais cela dépend bien entendu de l'allure même du « LAI » d'une part et l'étendue de la période critique d'autre part.

En conditions non limitantes le rendement en grains est le produit de la matière sèche aérienne par l'indice de récolte potentiel « $HI_{\text{pot.}}$ » Et « $S(j)$ » le rayonnement solaire incident (j/m^2) dont la somme est calculée depuis le date de semis jusqu'à la date de maturité définie en somme de température ($t_{\text{mat.}}$) (accessible dans la littérature).

$$Y_m = HI_{\text{pot}} RUE \sum_{\text{semis}}^{\text{maturité}} S(j) I(j) \dots\dots\dots(51)$$

$I(j)$: est la fraction de la radiation solaire interceptée :

$$I(j) = 1 - e^{-k LAI(j)} \dots\dots\dots(52)$$

Avec : $K = \min (1.0, 1.43 \text{ LAI}^{-0.5})$: extinction coefficient; « RUE » (g.M/j) est l'efficacité d'interception. Elle représente l'efficacité avec laquelle le rayonnement intercepté est utilisé pour fabriquer de la biomasse aérienne.

L'évolution au cours du cycle de ce paramètre est difficile à modéliser compte tenu de sa dépendance (mal connue) à de nombreux facteurs (Mailhol, 2001).

En conséquence il est préférable de proposer une valeur fixe pour ce paramètre voisine de celle atteinte à la maturité. L'approche utilisée ici pour le calcul de « Y_m » est compatible à celle proposée par Villalobos *et al.* (1996), et Chapman *et al.* (1993), cités par Mailhol (2001).

La prédiction de l'indice de récolte « HI », semble poser des problèmes aux modèles de cultures dont la plupart se fondent sur une évolution de type degrés/jour pour modéliser l'évolution de ce facteur. Cette difficulté est souvent contournée en lui assignant une valeur moyenne souvent proche du « $HI_{pot.}$ » (Mailhol, 2001).

Basé sur le « LAI », le modèle Pilote propose de modéliser l'indice de récolte « HI » en utilisant l'équation suivante :

$$HI = \text{Min} [HI_{pot} ; (HI_{pot} - a_r (LAI_{st} - LAI_{moy})] \dots\dots(53)$$

Où :

« LAI_{st} » est la valeur seuil de l'indice foliaire (moyenne calculé sur la période critique) en dessous de laquelle l'indice de récolte décroît linéairement (paramètre a_r) depuis sa valeur potentielle. (Mailhol, 2001).

Le calage et la validation du modèle Pilote, ont été effectués sur le cas de Blé dur variété Karim en Tunisie, et précisément à Saïda qui se situe à une vingtaine de Kilomètres au Sud – Est de Tunis. Ces essais ont été conduits en 1996 et en 1999.

Le sol est de type limono – argilo – sableux avec une réserve utile « RU » estimée à 160 mm/m, et une station météorologique complète au niveau du site expérimental.

Lors de la première campagne, le blé a été semé mi-novembre 1995. Cette campagne a eu la particularité d'être bien arrosée ($P = 552$ mm) évitant ainsi le recours à l'irrigation.

Le « LAI » aussi a fait l'objet d'un suivi particulier, son estimation reposant sur la méthode du planimètre optique. Les différents stades de développement ont été également notés, ce qui a permis, entre autres, de connaître la somme des températures correspondant au stade Floraison et par-là même somme des températures pour obtenir « LAI_{max} . » Après maturité du grain, des placettes de rendement ont été récoltées. Le suivi de la réserve du sol témoigne d'une bonne disponibilité en eau pour la plante à la faveur de ce printemps pluvieux. Un protocole assez similaire a été appliqué lors de la campagne 1999 à la différence près que le contexte climatique ($P = 276$ mm) a permis d'établir des traitements différenciés grâce à l'irrigation conduite cette année là en aspersion.

Des traitements T1 et T2 ont reçu respectivement 77 mm (20 mm le 19 Mars, 22 mm le 17 Avril, 18 mm le 30 Avril, et 17 mm le 05 Mai) ; et 16 mm (16 mm le 17 Avril).

Le résultat du calage des paramètres de forme « LAI » pour le cas de l'année 1996, et l'absence de stress hydrique est représenté dans le graphe ci-dessous :

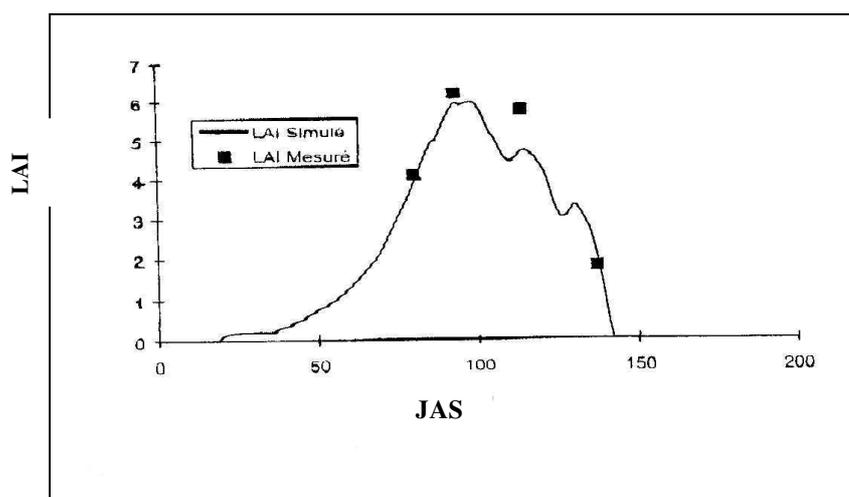


Figure 18 : Simulation du LAI sur le traitement sec
(Saida, Tunisie, 1999). (Mailhol, 2001)

Ce graphe, confirme le comportement satisfaisant du modèle qui représente une simulation réalisée sur le cas du traitement T2 de 1999 qui n'a reçu qu'un seul apport d'eau de 16 mm le 17 Avril. On notera par ailleurs une bonne concordance entre les stocks en eau simulés et mesurés (figure 19).

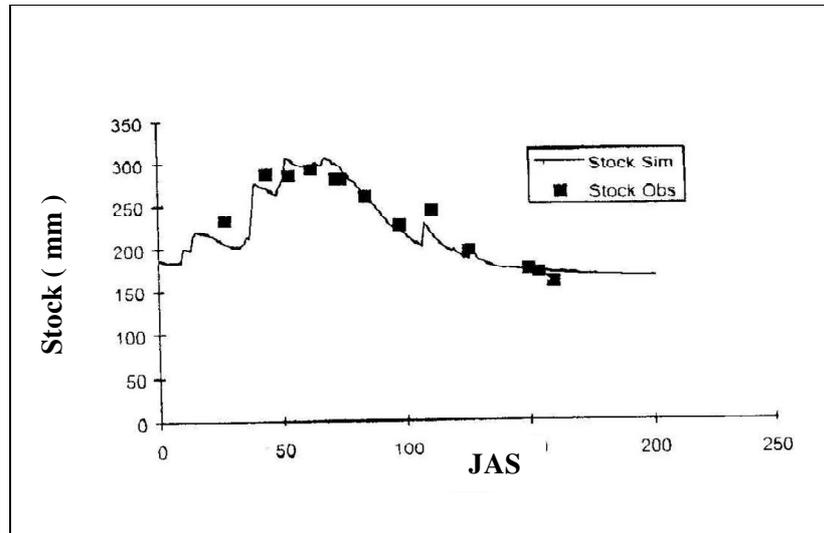


Figure 19 : Evolution de la réserve en eau du sol sur le traitement T2 (Saïda, Tunisie, 1999). (Mailhol, 2001)

Le traitement qui a reçu 4 irrigations est utilisé à titre de validation. Le modèle simule un rendement de 28 q/ha contre 32 q/ha observés, ce qui constitue un résultat provisoirement acceptable compte tenu du nombre de placettes par traitements et du coefficient de variation du rendement moyen mesuré ($\cong 8\%$). (Mailhol, 2001).

Chapitre 3 : « Pilotage de l'irrigation »

I.- Définition et Objectif du Pilotage de l'Irrigation par Bilan Hydrique :

I.1.- Définition du Pilotage de l'Irrigation :

Dans le but de régulariser la production en améliorant sa qualité, diversifiant les cultures et accroître les rendements à un meilleur coût ; avec l'irrigation il est nécessaire pour un agriculteur de pouvoir « maîtriser son irrigation », afin de satisfaire les objectifs techniques (de meilleurs rendements) et économique (à un coût optimal).

Pour cela, il va falloir répondre à trois questions essentielles et qui sont:

- Quand irriguer ? : En tenant compte de
 - Des besoins en eau des plantes.
 - Des réserves en eau dont les plantes peuvent disposer.
 - Des incidences du déficit en eau.
- Quelle est la dose d'irrigation à apporter ? Permettant de déterminer les doses d'irrigation qu'il faut apporter en complément.
- Comment apporter cette eau ? qui dépend du mode d'irrigation, du type de sol et de la nature des cultures.

Il faut donc porter des réponses précises pour garantir un potentiel de production quantitatif et qualitatif à moindre coût en évitant tout apport d'eau inutile, et parfois nuisible.

Pour répondre aux deux premières questions « quand et combien », on choisira le couple « dose – fréquence » ; et en ce qui concerne la troisième question « Comment » consistera en la manière de réaliser les apports avec un matériel bien déterminé constituant le mode d'irrigation.

Les réponses à ces trois questions simples nécessitent la combinaison de multiples facteurs qui, selon leurs propriétés et les objectifs fixés (coût,

confort, précision), donnent lieu à des solutions différentes (Chol et Tron, 1999).

I.2.- Objectif du Pilotage de l'Irrigation :

Lorsque la production maximale est obtenue sans contrainte d'alimentation en eau, le pilotage de l'irrigation aura principalement pour but d'éviter les stress hydriques sur l'ensemble du cycle de la culture. Pour cela il faudra répartir les irrigations sur l'ensemble du cycle de culture en respectant le niveau de stress admissible (Ruelle et al, 1995).

II.- Les étapes du pilotage de l'irrigation par bilan hydrique :

Le pilotage par bilan hydrique consiste à établir un suivi journalier des quantités d'eau Entrant et Sortant dans la zone effective racinaire. Il est basé sur l'estimation de la teneur en eau dans la zone racinaire.

Le schéma ci-dessous représente les différentes quantités d'eau Entrant et Sortant au niveau de la zone racinaire.

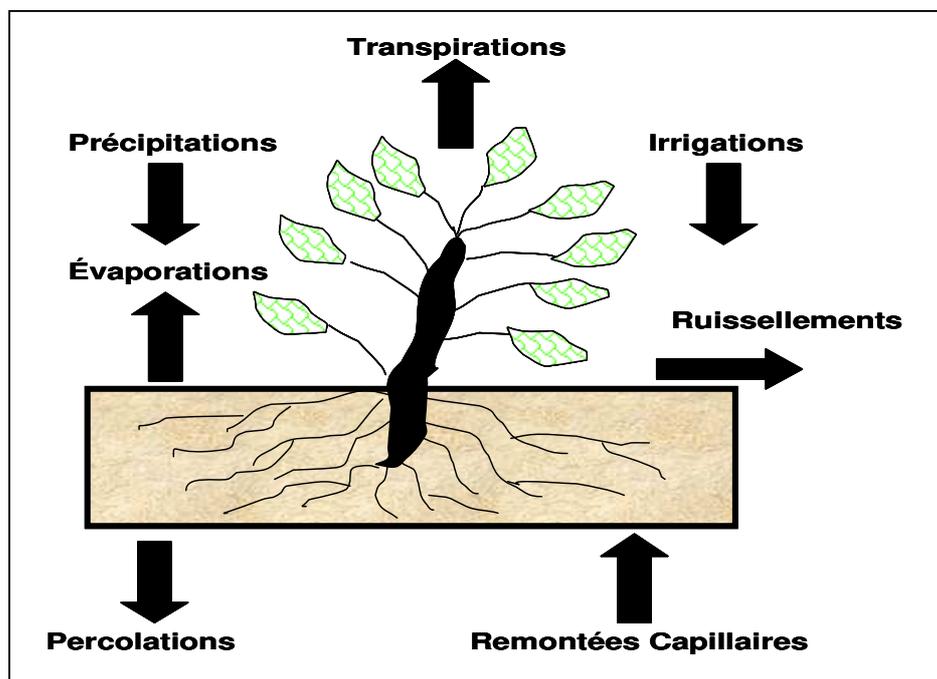


Figure 20 : Schéma représentant les différentes quantités d'eau Entrant et Sortant dans la zone racinaire. (Allen, et al, 1998)

Les apports sont représentés par l'irrigation et les précipitations. Une partie des apports est perdue par Ruissellement et n'atteint pas la zone des

racines et une autre quantité va être aussi perdue par Percolations. Le reste va constituer l'évaporation du sol et la transpiration de la plante.

Dans certaines situations de nappes superficielles, on peut noter des apports d'eau dans la zone racinaire par « Remontées Capillaires ».

L'équation du Bilan Hydrique s'écrit :

$$T_{wt} = T_{w(t-1)} + I + P - ET - D - R + F_c \dots\dots\dots(54)$$

T_w : Eau totale dans la zone racinaire au temps (t)

$T_{w(t-1)}$: Eau totale dans la zone racinaire au temps (t-1)

I : Irrigations.

P : Précipitations.

D : Drainage.

ET : Évaporation.

R : Ruissellement.

F_c : Flux Capillaire.

L'approche du pilotage par bilan hydrique impose la connaissance de la quantité d'eau initiale « T_w » dans la zone des racines. Ensuite, l'équation du bilan hydrique est résolue quotidiennement en considérant les Entrées et les Sorties dans la couche de sol considérée.

Les étapes du pilotage par bilan hydrique sont :

II.1.- Détermination de la zone racinaire effective (ZRE) :

La zone racinaire effective d'une culture représente la profondeur du sol dans laquelle l'irrigant veut contrôler la teneur en eau. Elle peut coïncider ou non avec la profondeur totale des racines. Le tableau suivant donne quelques exemples de valeurs maximales de la zone racinaire effective et le taux de tarissement de l'eau du sol pour éviter le stress hydrique.

Tableau 03 : Les différentes profondeurs racinaires et taux de tarissement de l'eau du sol :

Plante	Profondeur racinaire maximale (m)	Taux de Tarissement de l'eau du sol
Orge	1.0 à 1.5	0.55
Pois chiche	0.6 à 1.0	0.50
Cotton	1.0 à 1.7	0.65
Maïs	1.0 à 1.7	0.55
Millet	1.0 à 2.0	0.55
Artichauts	0.5 à 1.0	0.50
Sorgho	1.0 à 2.0	0.55
Soja	0.6 à 1.3	0.50
Tournesol	0.8 à 1.5	0.45
Blé	1.0 à 1.8	0.55

Source : Allen et al, 1998.

II.2.- Détermination de l'eau disponible totale :

L'eau disponible est la quantité d'eau dans la zone racinaire effective qui est disponible à la plante. A la suite d'une importante quantité apportée par irrigation ou précipitation, l'eau va percoler en profondeur en dehors de la zone racinaire effective jusqu'à ce que la limite supérieure de drainage ou capacité au champ « CC ou FC » soit atteinte. C'est la quantité d'eau que le sol peut retenir contre les forces de gravité.

La plante utilisera cette eau et va donc entraîner une diminution de la teneur en eau (en absence bien sûr d'irrigation et de pluie). Plus la quantité d'eau diminue, plus l'eau est retenue par le sol avec des forces beaucoup plus importantes et elle devient difficile à extraire par les racines des plantes.

Éventuellement, on peut atteindre un niveau d'eau du sol à partir duquel la plante ne peut plus extraire l'eau, c'est la limite inférieure d'extraction de l'eau par la plante, appelée aussi « point de flétrissement » (PF). Ces deux grandeurs permettent le calcul de la réserve utile selon :

$$RU = DUL - CLL \dots\dots\dots(55)$$

RU : eau disponible pour la plante, ou réserve utile.

Le tableau ci – dessous résume des ordres de grandeurs de la « RU » pour différents types de sol.

Tableau 04 : Les ordres de grandeurs de la « RU » pour les différents types de sol.

Type de sol	RU (mm/m)
Sable grossier	35 à 60
Sable	60 à 75
Sable limoneux	75 à 110
Limon sableux	100 à 160
Limon sables fins	145 à 185
Limon	170 à 250
Argile limon	170 à 220
Argile	150 à 200

Source : Allen et al, 1998.

L'eau disponible totale (TAW : Total Available Water) dans la zone racinaire est obtenue en multipliant la RU par la profondeur de la zone racinaire effective :

$$TAW = RU \cdot ZRE \dots\dots\dots(56)$$

ZRE : Zone racinaire effective.

II.3.- Détermination de la réserve facilement utilisable « RFU » :

Au fur et à mesure que l'eau du sol diminue, elle sera de plus en plus facile à extraire par les racines des plantes. Dès que la teneur en eau dépasse une valeur seuil, l'eau du sol ne peut être transportée assez rapidement vers les racines pour pouvoir satisfaire la demande de transpiration et la plante commence à être stressée. La fraction de la « TAW » que la plante peut extraire sans souffrir de stress est appelée « Réserve Facilement Utilisable ». Et elle s'obtient en multipliant « TAW » par le taux de tarissement (TxT) :

$$RFU = TAW \cdot TxT \dots\dots\dots(57)$$

II.4.- Détermination du point de remplissage :

Le point de remplissage « PR » représente le « Bilan Hydrique Total » dans la zone racinaire effective pour lequel l'irrigation est nécessaire. Il est déterminé en soustrayant la « RFU » de l'eau du sol totale correspondant à la DUL (T_{WDUL} : Total soil water at the DUL).

$$PR = W_{cc} - RFU \dots\dots\dots(58)$$

(DUL : Drained Upper Limit)

II.5.- Détermination de l'eau du sol totale initiale dans la zone des racines effective :

Afin de commencer du début le pilotage de l'irrigation, on a besoin de connaître l'état hydrique initial du sol dans la zone racinaire effective.

On peut la déterminer avant ou après l'émergence des plantes par mesures directes (gravimétrie) ou indirectes (Sonde à neutrons, TDR,...). On peut aussi, s'il n'y a pas de possibilités de mesures (la plus souhaitée), procéder à une pré-irrigation avec une dose telle que l'on puisse considérer que l'on parte avec une teneur en eau correspondant à la « T_{WDUL} ». Une fois connue la réserve initiale du sol, il est possible de l'estimer ensuite journalièrement par le biais du bilan hydrique.

II.6.- Détermination des flux d'eau entrant et sortant de la zone racinaire effective :

Les quantités d'eau entrant dans le sol sont caractérisées par les précipitations, qui sont mesurées à l'aide de pluviomètres ; et par les irrigations (I), qui sont calculées à partir de la durée (t) et du débit (Q) du système d'irrigation utilisé, ou bien en divisant la quantité totale d'eau nette apportée (W) par la surface correspondante (S) :

$$W \text{ (mm)} = Q \text{ (mm}^3 \text{ / sec)} \cdot t \text{ (sec)} \dots\dots\dots(59)$$

$$I \text{ (mm)} = W \text{ (mm}^3 \text{)} / S \text{ (mm}^2 \text{)} \dots\dots\dots(60)$$

Si l'irrigation ou la pluie dépasse le seuil de rétention de la zone racinaire effective, la différence est considérée comme drainage et / ou ruissellement.

Le flux capillaire est souvent négligé sauf en cas de nappes superficielles dont il faut en estimer la profondeur et voir si elle peut influencer considérablement l'eau dans la zone racinaire effective.

L'évapotranspiration est estimée à partir de données climatiques et de paramètres relatifs à la culture :

$$ET = K_c \cdot ETO \dots\dots\dots(61)$$

Avec :

K_c : coefficient cultural

ETO : Évapotranspiration de référence.

L'évapotranspiration de référence est calculée par la formule de « Penman – Monteith » nécessitant les données suivantes : Rayonnement Global en (J/cm^2) ; l'Humidité moyenne de l'air ; la température moyenne de l'air en ($^{\circ}C$) ; et la vitesse moyenne du Vent en (Km/h).

Les valeurs du « K_c » dépendent du type de culture envisagée et varient suivant son cycle de développement. Le tableau ci-dessous donne les « K_c » pour différentes cultures.

Tableau 05 : Les différents « K_c » pour les différentes cultures.

Cultures	K_c Initial	K_c Mi – Saison	K_c Fin - Saison
Orge	0.30	1.15	0.25
Pois chiche	0.40	1.00	0.35
Cotton	0.35	1.15 à 1.20	0.70 à 0.50
Maïs	0.30	1.20	0.35
Arachide	0.40	1.15	0.60
Sorgho	0.30	1.00 à 1.10	0.55
Soja	0.40	1.15	0.50
Tournesol	0.35	1.15	0.35
Blé	0.30	1.15	0.25

Source : Allen et al. (1998).

Les stades de développement utilisés pour la sélection des valeurs des « **Kc** » sont :

1. Stade initial : du Semis jusqu'à une couverture de 10 %.
2. Stade Développement : d'une couverture 10 % jusqu'à une couverture effective (70 % à 80 %).
3. Stade mi-saison : commence de 70 % à 80 % de couvert jusqu'au début maturité.
4. Stade fin saison : du Début maturité jusqu'à la récolte.

II.7.- La décision d'irrigation :

Quand la réserve en eau totale dans la zone racinaire effective descend en dessous du point de remplissage, alors on procède à une irrigation. La quantité d'eau à apportée est égale à la différence entre « TW_{DUL} » et « Twt ».

II.8.- Ajustement du bilan hydrique :

Etant donné que le bilan hydrique est basé sur des estimations pouvant entraîner des imprécisions, il est nécessaire de procéder, quelquefois, à un contrôle de la réserve en eau du sol, par (gravimétrie) ou (neutronie) pour mettre à jour le bilan hydrique.

III.- Les méthodes des pilotages de l'irrigation :

Le déficit hydrique dans les différentes régions arides et semi – arides, a permis au cours des années, l'élaboration et le développement de diverses techniques et méthodes visant à assurer une meilleure gestion des irrigations.

Ces méthodes dépendent essentiellement des caractéristiques du sol, des exigences des végétaux et du climat, qui sont généralement exploités séparément ou de manière complémentaire. Certaines de ces méthodes constituent des outils d'aide à la décision pour programmer l'irrigation (quand doit – on irriguer ?); d'autres vont jusqu'à calculer le volume d'eau nécessaire par apport .

D'après Martin (2002), Le choix d'une méthode de pilotage de l'irrigation se base sur de nombreux facteurs tels que :

- Espèce (le cycle de développement de la culture et les pratiques culturales).
- La technique d'irrigation appliquée (de surface, aspersion, goutte à goutte).
- Le coût de l'équipement de pilotage.
- Le temps disponible pour collecter les données.
- ... etc.

III.1.- Les méthodes liées au sol :

Au champs, deux mesures permettent d'évaluer la disponibilité de l'eau dans le sol : La teneur en eau volumique « θ_v », et l'énergie avec laquelle l'eau est retenue dans le sol : Le potentiel ou tension « ψ_s ».

Ces mesures sont, généralement, faciles à réaliser et suffisamment fiables pour une conduite efficace de l'irrigation. Selon l'appareil utilisé, elles peuvent compléter et même remplacer la méthode du bilan hydrique qui basée essentiellement sur les données météorologiques.

III.1.1.- La teneur en eau du sol :

Pour mesurer la teneur eau d'un sol, il faut mesurer son humidité à plusieurs profondeur et en répétant les mesures à différentes dates, ce qui permet le suivi de l'évolution de l'état hydrique du sol au cours du temps. Cette grandeur donne la quantité d'eau présente dans un volume unitaire (généralement, m^3) de sol. Elle est accessible par différentes mesures :

- a. Mesure destructrice (ou directe) : Gravimétrie.
- b. Mesure non destructrice (ou indirecte) : Sonde à neutron, TDR....

a. Mesure destructrice (ou directe) :

Cette méthode de mesure permet l'obtention des teneurs en eau pondérales, la méthode la plus utilisée est la méthode « gravimétrique ». Elle

consiste à prélever des échantillons de sol à l'aide d'une **Tarière** ou **Cylindre**, à peser une première fois ces échantillons à l'état humide et une seconde fois après passage à l'étuve pendant vingt-quatre heures à une température de 105°C.

C'est une méthode simple par le matériel qu'elle exige (Tarière ou Cylindre, Boîte, Étuve), mais elle est longue et destructrice. On peut prélever des échantillons de sol qu'une seule fois à un endroit donné, de plus elle impose de mesurer la densité apparente pour avoir l'humidité volumique, cette dernière reste une opération délicate par le risque de compression du sol lors de l'échantillonnage d'où l'estimation de la densité.

Cependant, la méthode gravimétrique reste une méthode de référence par rapport à laquelle, toutes les autres sont calées.

b. Mesure non destructrice (ou indirecte) :

Pour réaliser ces mesures dans le sol en place, il existe plusieurs méthodes qui nécessitent un étalonnage au préalable pour établir la relation propriété-humidité. Ces mesures permettent d'obtenir la teneur en eau du sol à des horizons profonds, parmi ces méthodes :

- La méthode neutronique de profondeur « sonde à neutrons ».
- Les mesures capacitives ou, plus récemment, la méthode 'TDR' : Time Domain Reflectometry (Réflectométrie dans le domaine temporel).

Remarque : Pour mettre en œuvre la mesure neutronique, il faut d'abord étalonner la sonde à neutron dans le sol étudié, c'est-à-dire, établir la relation de référence entre comptage neutronique et humidité volumique. La mesure neutronique est fiable pour des profondeurs supérieures à 20 cm. Les mesures de surface ne sont pas effectuées dans une zone homogène.

III.1.2.- Le potentiel hydrique :

Le potentiel hydrique « ψ » utilisé par les Agronomes et les physiologistes traduit les faits des différentes forces de liaison (osmotiques, capillaires ...) existant entre les molécules d'eau et les constituants du sol ou de la plante. Il peut être défini de façon schématique comme le travail qu'il faudrait fournir

à une unité de masse d'eau située en un plan du système pour la faire passer de l'état d'eau liée à un état de référence correspondant à celui de l'eau libre à la même température et à la même pression atmosphérique. Si l'on adopte la valeur « 0 » pour l'état de référence tous les autres potentiels caractérisant l'eau liée seront négatifs, l'eau circulera alors dans le sens des potentiels décroissant.

A une même teneur en eau dans les sols, ces derniers présentent des comportements hydriques différents, et ceci est dû à la constitution de chaque type de sol, un sable à 10 % d'humidité paraît humide au toucher alors qu'une tourbe semble très sèche, des végétaux présents sur cette tourbe à 30 % d'humidité seraient incapables d'en extraire l'eau très fortement retenue.

La notion d'humidité est insuffisante pour traduire le comportement hydrique, il faut faire intervenir la succion exercée par le sol, ceci conduit à introduire une autre notion : le potentiel matriciel (*Vilain, 1997*).

Les forces de liaison de l'eau et du sol sont donc caractérisées par une variable appelée communément tension ou succion, exprimée en unité de pression (pascal, bars, cbars, hauteur d'eau équivalente 'h' en centimètre...).

Le potentiel du sol est approché par mesure, au moyen de « tensiomètre », de la pression de succion exercée sur l'eau par le sol. Cet instrument permet la mesure de la charge totale à une profondeur donnée. L'observation d'un profil de charge permet d'estimer le sens du flux d'eau dans le sol. Cependant, les tensiomètres ne peuvent permettre des mesures au delà de - 0.1 MPa, alors que théoriquement on peut observer des charges inférieures à -1.0 MPa.

La mesure de cette tension peut être réalisée par des appareils composés d'un organe de mesure qui traduit la tension de l'eau dans le sol, comme : les tensiomètres, et les sondes 'WATERMARK'.

III.1.3.- Relation pF-humidité :

Le potentiel de l'eau varie de 0 en sol saturé, à 10 000 000 cm en sol sec, vu les valeurs élevées possibles, par analogie avec le pH, on a convenu de l'exprimer par son logarithme décimal appelé pF.

Le pF se définit comme le logarithme décimal de la valeur absolue du potentiel de l'eau du sol, celui-ci étant mesuré en cm d'eau, on a donc :

$$pF = \text{Log}_{10}h \dots\dots\dots(62)$$

Il n'existe pas de relation générale entre le pF et l'humidité du sol, on peut obtenir qu'une relation expérimentale.

Les courbes « PF-humidité » (Figure 21) dépendent de la constitution des sols, elles présentent cependant une forme analogue, elles sont d'une importance fondamentale car elles expriment l'influence de la structure, de la porosité, de la distribution des pores et de l'absorption sur l'état hydrique du sol, à leur tour, cet état et ses variations dans le profil déterminent la direction et influencent le régime du mouvement de l'humidité du sol et du prélèvement en eau par les plantes.

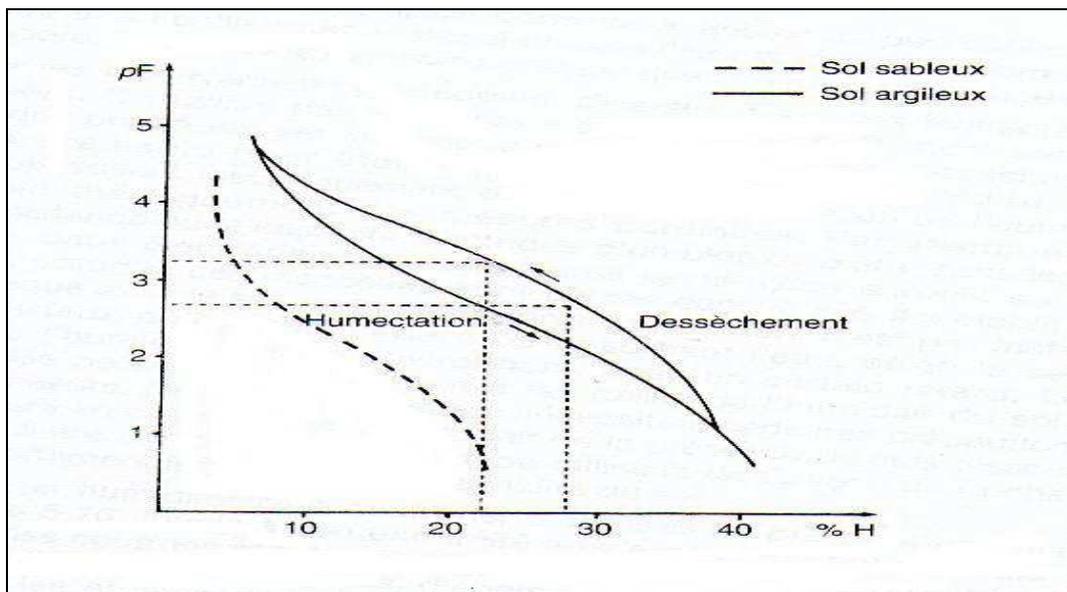


Figure 21 : Relation « pF - Humidité du sol »
(Vilain, 1997)

Ces courbes diffèrent selon que l'on soumet le sol à un dessèchement ou une humectation, à un même pF (même rétention), l'humidité est plus faible lors de la ré - humectation que du dessèchement (Vilain, 1997).

III.2.- Méthodes liées à la plante :

Plusieurs études concernant l'alimentation en eau des cultures et ses conséquences sur le fonctionnement des végétaux, requièrent le contrôle et le suivi de l'état hydrique de celles-ci au moyen d'indicateurs appropriés. Ces indicateurs constituent des outils intéressants et essentiels pour contrôler et piloter les irrigations dans le but d'une meilleure gestion de l'eau.

Le bilan d'eau dans la plante dépend de son environnement (climat, sol). Le climat détermine la demande instantanée en eau, le sol évolue à une vitesse beaucoup plus faible mais il limite la disponibilité en eau. L'état hydrique d'une plante évolue donc en fonction du climat et du sol.

Comme dans le sol, il existe plusieurs méthodes de contrôle et de suivi de l'état hydrique de la plante, les plus utilisés sont :

III.2.1.- La teneur en eau du végétale :

Cette teneur est mesurée par la méthode suivante : on mesure les masses humides, et après passage à l'étuve on détermine les masses sèches. La masse d'eau n'est intéressante que par comparaison à une référence ; La meilleure référence est la teneur en eau à la turgescence et on préconise donc l'utilisation de la teneur relative en eau « RWC » comme indicateur de déficit hydrique :

$$\text{RWC} = \frac{(\text{Poids humide du végétal} - \text{Poids sec du végétal})}{(\text{Poids turgescence} - \text{Poids sec})} \dots\dots (63)$$

Le poids à la turgescence est obtenu en laissant s'imbiber le morceau de feuille étudié dans de l'eau, ce qui permet l'obtention de la teneur en eau maximale.

III.2.2.- Le potentiel foliaire :

Le potentiel au niveau de la plante augmente en fonction du déficit hydrique. Pour caractériser l'état hydrique d'une plante, on peut mesurer sa teneur en eau relative. Le seuil de référence qui permet de caractériser un stress hydrique est le « point de flétrissement permanent ».

En terme de potentiel, il dépend de la plante et de la durée du stress (pour des plantes cultivées et un stress court : ψ_s (seuil) \approx de (-1.0) à (-1.6) MPa. Pour des stress progressifs (intervention des mécanismes d'ajustement osmotique) : ψ_{seuil} peut atteindre (-2.8) à (-3.0) MPa).

La rétention de l'eau dans la plante est la résultante de différents composants du potentiel, il s'agit de :

- Potentiel osmotique « ψ_o » .
- Potentiel matriciel « ψ_m » .
- Potentiel de turgescence « ψ_{tur} » .

Et on aura donc un potentiel total exprimé comme suit :

$$\Psi_{total} = \psi_o + \psi_m + \psi_{tur} \dots\dots\dots (64)$$

En conditions normales, tous les termes du potentiel sont négatifs à l'exception de « ψ_{tur} » qui est positif. Les signes positifs et négatifs sont donnés par référence à « 0 » qui est le potentiel de l'eau pure. Le potentiel varie aussi avec la zone de la plante dans laquelle il est étudié, on peut aussi définir le potentiel dans la feuille, dans la tige et dans les racines.

Il y a plusieurs méthodes de mesure du potentiel (travaux de Campbell, 1984), mais la mesure pratiquée au champ est la mesure du potentiel foliaire par la méthode de « **la chambre de pression** » appelée « **chambre de Scholander**, 1964 ». La mise sous pression d'une feuille dans une chambre étanche et laissant sortir que le pétiole, permet de déterminer la pression dans la chambre pour laquelle on voit apparaître un ménisque à l'extrémité du pétiole, on estime alors que la pression dans la chambre est égale au potentiel de l'eau dans la feuille exprimé en « Bar ou en MPa ».

Si on néglige le composant osmotique qui est, en générale, très faible on aura donc une mesure du potentiel dans le Xylème, l'énergie avec laquelle l'eau est pompée par la feuille.

Le potentiel foliaire est traduit donc par l'état de liaison de l'eau à l'intérieur des tissus végétaux, lorsque sa valeur absolue est faible (de 1 à 5 bars) la plante transpire sans difficulté, lorsqu'il s'élève (au delà de 10 bars) des mécanismes de régulation provoquent la fermeture des stomates.

III.2.3.- La résistance stomatique « Rs » :

En l'absence de régulation photique liée à un éclairage insuffisant, l'accroissement de « Rs », entraîne généralement un dessèchement relatif des feuilles ce qui conduit à une réduction de la transpiration végétale et de l'assimilation, ainsi a-t-elle été considérée longtemps, comme un critère particulièrement valable pour exprimer les conditions momentanées d'alimentation hydrique.

Par la suite il est apparu que cet indicateur n'est pas lié à certaines fonctions de la plante, comme la différenciation et l'élongation cellulaire, car elle sont inhibées plutôt en condition de contrainte hydrique.

Cet indicateur demeure toutefois une donnée de référence intéressante mais difficile à mesurer ; « Rs » présente, en effet, des variations spatiales importantes selon l'âge de la feuille, l'éclairage à l'intérieur du couvert, ainsi qu'à l'échelle - même de la feuille (*Katerji, 1997*).

III.2.4.- La température foliaire :

La température foliaire se trouve liée à de très nombreux phénomènes fondamentaux : réactions chimiques, croissance et développement, échanges sous différents modes d'évaporation, ... etc.

Une mesure de la température du couvert pendant toute une journée bien ensoleillée donne une courbe convexe commençant par un minimum aux premières heures de la journée (l'aube) et finissant aussi après le coucher du soleil. Le maximum est atteint au midi solaire.

Cette température n'est que les radiations émises par le couvert dans l'infrarouge thermique, captée avec un radio-thermomètre qui la traduit en terme de température est un indicateur intéressant, compte tenu du rôle central joué par les stomates dans le contrôle de la perte en eau.

L'évaporation de l'eau au niveau des feuilles refroidit ces dernières, mais quand, en réponse à une sécheresse les stomates se ferment, la transpiration baisse et la température de la feuille augmente. Ce changement de température étant associé à une variation de l'émission de rayons infrarouges peut être mesurer à distance à l'aide d'un radio - thermomètre portable.

III.2.5.- Etat de développement du couvert foliaire :

La croissance et/ou la régression des surfaces foliaires de certaines espèces évolue de façon marquée en fonction de l'état hydrique des plantes.

Dans la phase d'établissement du couvert végétal, il est possible d'appréhender le développement foliaire par l'évolution de l'interception de l'énergie lumineuse; elle est obtenue par la différence entre le rayonnement mesuré, dans une bande de longueurs d'ondes donnée, par un capteur placé au sommet de la végétation et un autre au sol, au sein de la culture, l'efficacité d'interception « E_i » est calculée en faisant le rapport entre cette différence et l'énergie incidente au sommet du couvert (*Merrien et al, 1995*).

III.2.6.- Micro variation de diamètre d'un organe :

La mesure du diamètre des tiges est un outil efficace d'aide à la décision pour le déclenchement de l'irrigation, car le stress hydrique a un effet sur l'évolution du diamètre des tiges ; les variations sont de l'ordre du micron (*Lecoeur, 1994; in Abbadi et al., 1997*)

L'évolution en continu des gains ou des pertes en eau peut être réalisée in situ en mesurant avec précision, par micrométrie, à l'aide de capteurs enregistrant les variations de leur diamètre, les contractions d'organes comme la tige ou le fruit. Le traitement informatique des données recueillies permet de déterminer à quel moment la plante subit une contrainte pouvant affecter la production et de déclencher alors un apport d'eau.

L'avantage de cette méthode est qu'elle s'appuie sur des mesures automatisables non destructives. L'inconvénient est que son application nécessite une détermination préalable de la valeur seuil correspondant à l'apparition de la contrainte hydrique.

III.2.7.- Flux de sève :

Des mesures de flux de sèves peuvent également être effectuées dans les organes ligneux des arbres par voie thermique, le capteur est constitué de deux sondes renfermant chacune un thermocouple, inséré dans le bois et monté en opposition. L'un constituant la sonde froide et l'autre, chauffé sous puissance constante, la sonde chaude.

En l'absence de flux de sève, un écart de température maximal apparaît entre les deux sondes, en présence d'un flux une partie de la chaleur étant évacuée par convection au niveau de la sonde chaude, l'écart de température s'établit à une valeur inférieure. Le Tableau 07 ci après (p.76) permet de résumer les différentes méthodes du pilotage de l'irrigation liées à la plante.

VI.- Méthodes liées à l'atmosphère :

A partir du bilan d'énergie et du bilan radiatif, plusieurs informations peuvent être tirées. La détermination du rayonnement net « R_n » et le flux de chaleur convective (H) par exemple, permet d'aboutir à un indicateur « H/R_n » qui serait utilisé pour l'avertissement dans le pilotage des irrigations (*in Imache 2001*) .

Tableau 06 : Outils de contrôle de l'état hydrique de la plante :

Indicateurs (Méthodes)	Avantages et Inconvénients	Développement actuel	Appareil de mesure	perspectives
Potentiel hydrique foliaire	<ul style="list-style-type: none"> - Bon indicateur de l'état hydrique. - Contrainte de mise en œuvre. 	-Outil très utilisé au niveau de la recherche (contrôle de l'état hydrique des plantes).	- Chambre à pression.	<ul style="list-style-type: none"> - Outil de diagnostic agronomique. - Possibilité de mettre au point un matériel moins onéreux.
Température foliaire	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure simple et intégratrice de l'état du couvert. - Conditions météorologiques contraignantes et périodicité. 	- Les seuils des écarts de température cumulés sont établis pour plusieurs cultures (Maïs, Soja, Blé ...)	- Radio – thermomètre.	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure prise en compte des fluctuations du climat. - Etablissement de nouveaux indices thermiques.
Micro – variation de diamètre d'un organe	<ul style="list-style-type: none"> - Système automatisé facilite la mise en œuvre sur espèces ligneuses. - Nécessite de compléter le diagnostic. 	- Sur arbres fruitiers pour piloter l'irrigation dans un but de régularisation de la qualité de la récolte	- Bio – programmeur.	<ul style="list-style-type: none"> - diagnostic d'autres limitations que celles liées à l'eau. (par ex. : Nutrition minérale)
Etat du développement du couvert végétal	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure simple et rapide, renouvelable au cours du cycle. - Outil de diagnostic, plus que de conduite. 	- Proposée sur tournesol et en cours d'établissement sur d'autres cultures.	/	- Définition des états optimaux de croissance pour différentes espèces génotypes.
Flux de sève	- Délicate à mettre en œuvre.	- Possible sur espèces ligneuses.	/	- Automatisation possible.

Source : Merrien A. et al., 1995.

Partie II :
Matériels et Méthodes

INTRODUCTION :

Notre travail s'inscrit au terme de six (06) campagnes expérimentales ayant porté sur la croissance du blé dur (variété Vitron essentiellement) sous différents régimes hydriques. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un projet de coopération entre l'Institut National Agronomique d'Alger et celui de Paris-Grignon avec comme thème central " **Ressources en eau et irrigation de complément des cultures, plus particulièrement les céréales**".

Les campagnes de mesures durant les différents essais successifs ont porté essentiellement sur les états hydriques du sol (teneur en eau et pression) ainsi que les paramètres physiologiques de la culture (Indice foliaire, température du couvert, teneur en eau relative, potentiel foliaire, enracinement ...).

Notre travail vise à faire une évaluation de toutes ces campagnes à travers deux paramètres importants :

- *La cinétique des indices foliaires LAI.*
- *La cinétique hydrique par le biais de la réserve en eau du sol.*

Pour cela, nous avons axé notre étude sur une confrontation avec les mêmes paramètres issus d'une simulation à l'aide de deux modèles de bilan hydrique :

- *Le modèle Bilhyna (Perrier , INA Paris Grignon) qui constitue la clé de voûte du projet de coopération cité plus haut .*
- *Le modèle Pilote (Mailhol, Cemagref Montpellier) ayant fait aussi l'objet de discussions dans le cadre du même projet.*

Nous utiliserons donc ici deux approches, basées certes sur le LAI, mais différentes en ce qui concerne les aspects liés à la modélisation (partie bibliographique) .

De ce fait, l'objectif principal de notre étude porte essentiellement sur une « para métrisation » des modèles en fonction des conditions du site d'étude.

I.- PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE :

I.1.- Présentation du site :

Les six essais expérimentaux (de 2000 à 2005) faisant l'objet de notre étude, ont été menés au niveau de la station expérimentale de l'Institut National d'Agronomie (INA) El - Harrach et qui est caractérisée par les coordonnées géographiques suivantes :

36° 43' Nord de latitude.

3° 08' Est de longitude.

48 m d'altitude.

(Source : station météorologique de l'INA 2001)

I.2.- Caractéristiques expérimentales :

I.2.1.- Caractéristiques climatiques générales :

Faisant partie de la plaine de la Mitidja, notre zone d'étude pour les six (06) essais est caractérisée par un climat Méditerranéen à étage bioclimatique Sub - humide à hiver doux et pluvieux, et un été chaud et sec (Aïdaoui et Hartani, 2000).

Le diagramme ombrothermique (Figure 22) de cette zone d'étude, établi pour une période allant de 1952 à 2004, montre qu'on peut distinguer deux périodes :

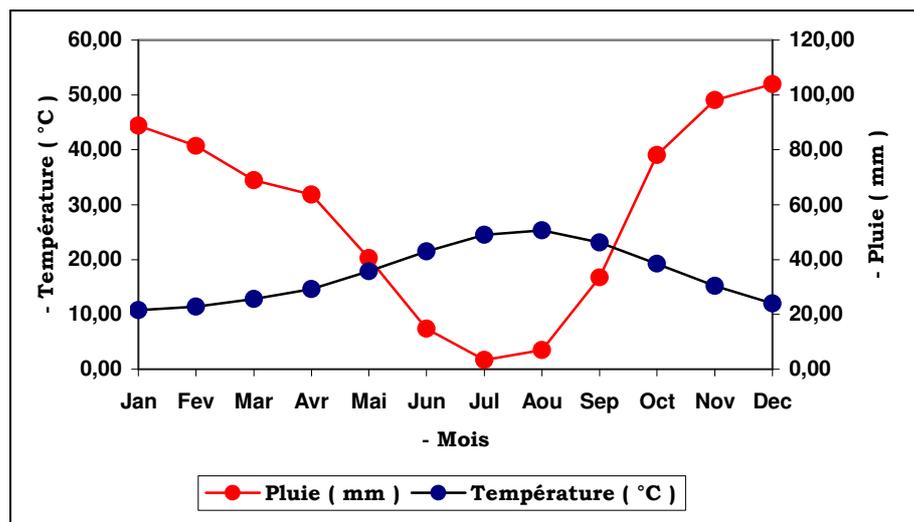


Figure 22 : Diagramme ombrothermique
(REGION EL HARRACH, période de 1952 - 2004)

(Source : station météorologique de Dar El Baida)

a.- Une période humide et froide, allant de Janvier jusqu'au début du mois de Mai, puis de la fin du mois d'Octobre jusqu'à la fin du mois de Décembre.

b.- La seconde période chaude et sèche est comprise entre la fin du mois de Mai et la fin du mois d'Octobre.

I.2.2.- Caractéristiques climatiques de la région d'étude :

a.- La température de l'air :

La Figure 23 ci – après montre l'évolution des températures moyennes mensuelles (minimales, maximales et moyennes) de la série climatique 1952–2004 :

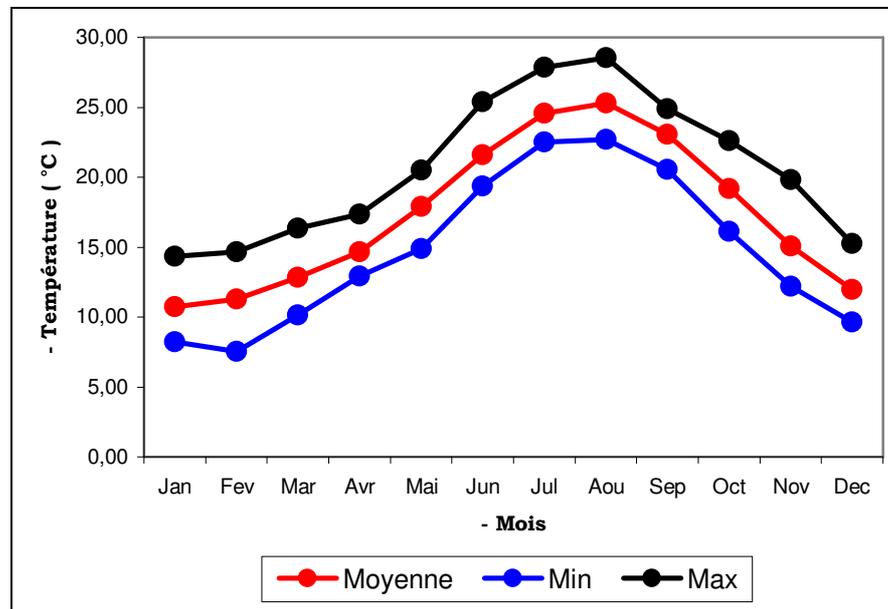


Figure 23 : Température de l'air moyenne mensuelle
(Station ONM Dar El Beida - Période 1952 - 2004)

Nous remarquons que les températures minimales varient entre 7.52°C enregistré durant le mois de Février, et 22.69°C pour le mois d'Août.

Pour les températures maximales nous avons enregistré une valeur minimale de 14.33°C le mois de Janvier, et une valeur maximale de 28.53°C pour le mois d'Août.

En ce qui concerne les températures moyennes, nous avons noté un minimum de 10.73°C pour le mois de Janvier, et un maximum de 25.29°C pour le mois d'Août.

Les valeurs des températures moyennes, maximales et minimales de la série climatique sont présentées dans le tableau 07 suivant :

Tableau 07 : Valeurs des températures moyennes, minimales et maximales mensuelles :

Température	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Moyenne annuelle
Moyenne	10,7	11,3	12,8	14,7	17,9	21,6	24,6	25,3	23,0	19,2	15,1	12,0	17,3
Min	8,2	7,5	10,1	12,9	14,9	19,4	22,5	22,7	20,5	16,1	12,2	9,6	14,7
Max	14,3	14,7	16,4	17,3	20,5	25,4	27,8	28,5	24,9	22,6	19,8	15,3	20,6

La culture du blé a la particularité d'exiger une température supérieure à 0°C, mais aussi une baisse de température est nécessaire pour les variétés hivernales. L'on remarque donc qu'en ce qui concerne la période végétative de la culture étudié (allant de Décembre à Juin), les températures de l'air sont dans l'ensemble favorables à une croissance optimale.

b.- Humidité de l'air :

La Figure 24 suivante montre les humidités de l'air moyennes mensuelles (moyennes, minimales et maximales) enregistrées pour la série climatique (1952 – 2004).

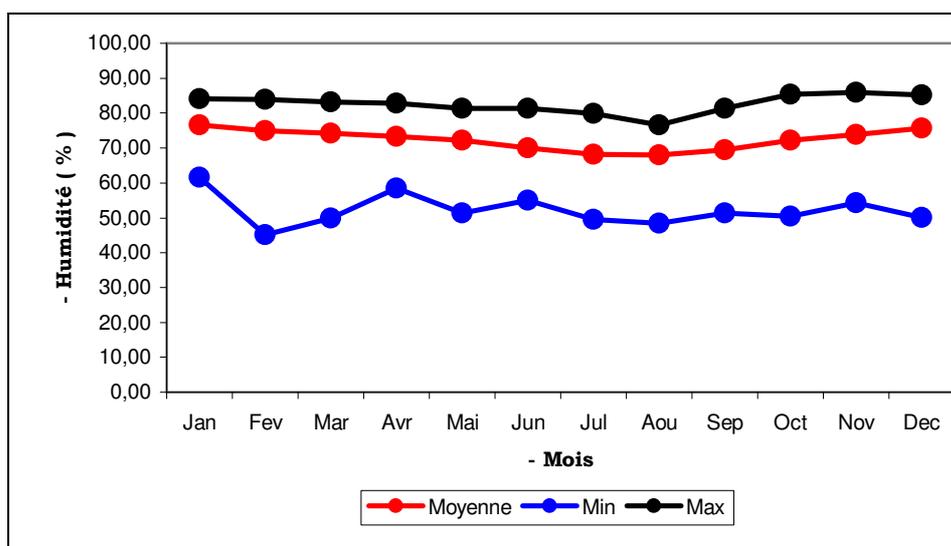


Figure 24 : Humidité de l'air moyenne mensuelle (Station ONM Dar El Beida - Période 1952 - 2004)

Ce graphique nous permet de constater ce qui suit :

- Les humidités minimales évoluent avec des amplitudes plus ou moins importantes variant entre les valeurs de 45.11 % le mois de Février et 61.55 % en Janvier.
- Les humidités moyennes enregistrées varient entre 68.05 % le mois de Janvier et 76.56 % le mois de d'Août.
- Les humidités maximales varient entre 76.65 % le mois d'Août et 85.95 % le mois de Novembre.

Les valeurs humidités de l'air moyennes, maximales et minimales mensuelles de la série climatique 1952 – 2004 sont notées dans le tableau 08 suivant :

Tableau 08 : Valeurs des humidités de l'air moyennes mensuelles (%) :

Humidité	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Moyenne annuelle
Moyenne	76,6	75,0	74,2	73,4	72,3	70,1	68,3	68,0	69,4	72,3	73,8	75,8	72,4
Min	61,5	45,1	50,0	58,4	51,3	55,0	49,6	48,4	51,4	50,5	54,4	50,1	52,2
Max	84,0	83,8	83,2	82,9	81,3	81,4	79,8	76,7	81,4	85,3	86,0	85,2	82,6

c.- Vitesse du vent :

Le graphique ci-dessous représente les vitesses du vent moyennes, maximales et minimales mensuelles enregistrées durant la série climatique (1952 – 2004) :

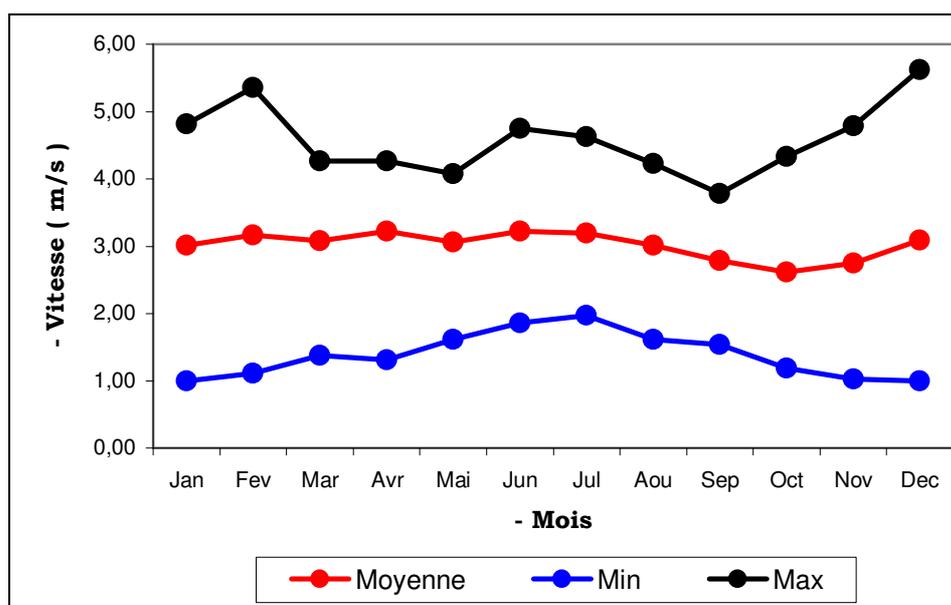


Figure 25 : Vitesse du vent moyenne mensuelle
(Station ONM Dar El Beida - Période 1952 - 2004)

Le graphique montre de grandes variations de la vitesse du vent avec :

- Pour la vitesse du vent minimale, des valeurs variant de 0.99 m/s pour les mois de Janvier et Décembre, et 1.97 m/s enregistré pour le mois de juillet.
- La vitesse du vent maximale évolue avec des amplitudes importantes variant entre 3.78 m/s et 5.62 m/s respectivement pour les mois de Septembre et Décembre.
- Pour ce qui est de la vitesse du vent moyenne, ses valeurs oscillent entre 2.62 m/s pour le mois d'Octobre et 3.22 m/s pour le mois de Juin.

Les valeurs de la vitesse du vent moyennes, maximales et minimales mensuelles de la série climatique 1952 – 2004 sont résumées dans le tableau 09 suivant :

Tableau 09 : Valeurs de la vitesse du vent moyennes mensuelles (m/s).

Vent	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Moyenne annuelle
Moyenne	3,0	3,2	3,1	3,2	3,1	3,2	3,2	3,0	2,8	2,6	2,8	3,1	3,0
Min	1,0	1,1	1,4	1,3	1,6	1,9	2,0	1,6	1,5	1,2	1,0	1,0	1,4
Max	4,8	5,4	4,3	4,3	4,1	4,7	4,6	4,2	3,8	4,3	4,8	5,6	4,6

d.- Durée d'insolation :

Le graphe (Figure 26) montre l'évolution des durées d'insolation moyennes mensuelles de la série climatique (1952 – 2004) :

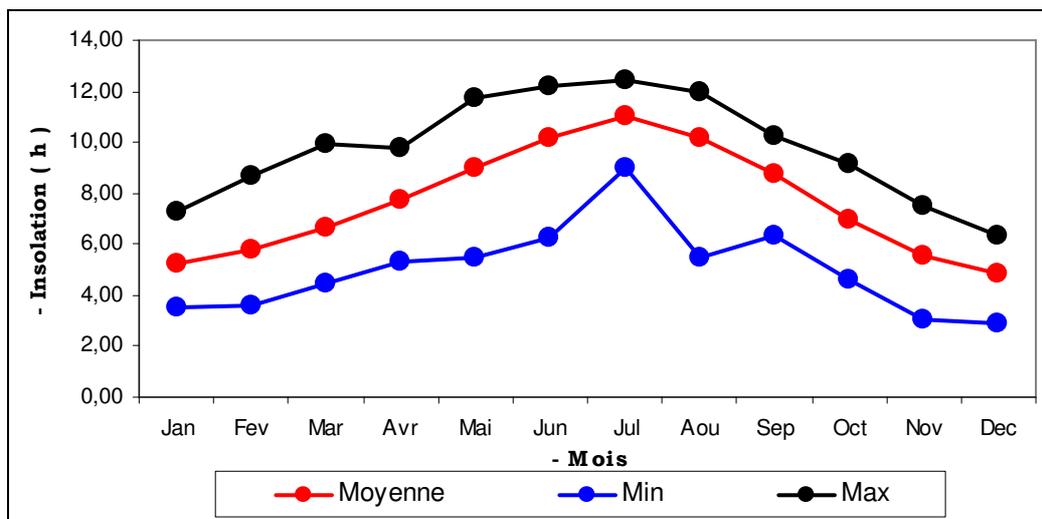


Figure 26 : Durée d'insolation moyenne mensuelle (Station ONM Dar El Beida - Période 1952 - 2004)

Nous remarquons qu'il y a une variabilité importante des valeurs de la durée d'insolation minimale qui varient entre 2.91 h pour le mois de Décembre et 9.01 h pour le mois de Juillet.

La durée d'insolation moyenne varie de 4.86 h le mois de Décembre à 11.0 h le mois de Juillet.

La durée d'insolation maximale évolue avec des valeurs allant de 6.34 h le mois de Décembre et 12.42 h le mois de Juillet.

Les valeurs de la durée d'insolation moyennes, maximales et minimales mensuelles de la série climatique obtenues sont notées dans le tableau 10 suivant :

Tableau 10 : Valeurs de la durée d'insolation moyennes mensuelles (h).

Insolation	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Moyenne annuelle
Moyenne	5,2	5,8	6,7	7,7	9,0	10,2	11,0	10,1	8,7	6,9	5,6	4,9	7,7
Min	3,5	3,6	4,5	5,3	5,5	6,3	9,0	5,5	6,3	4,6	3,0	2,9	5,0
Max	7,3	8,7	9,9	9,8	11,8	12,2	12,4	11,9	10,3	9,2	7,5	6,3	9,8

e.- Les précipitations :

La Figure 27 suivante, montre l'évolution des précipitations moyennes mensuelles de la série climatique 1952 – 2004 .

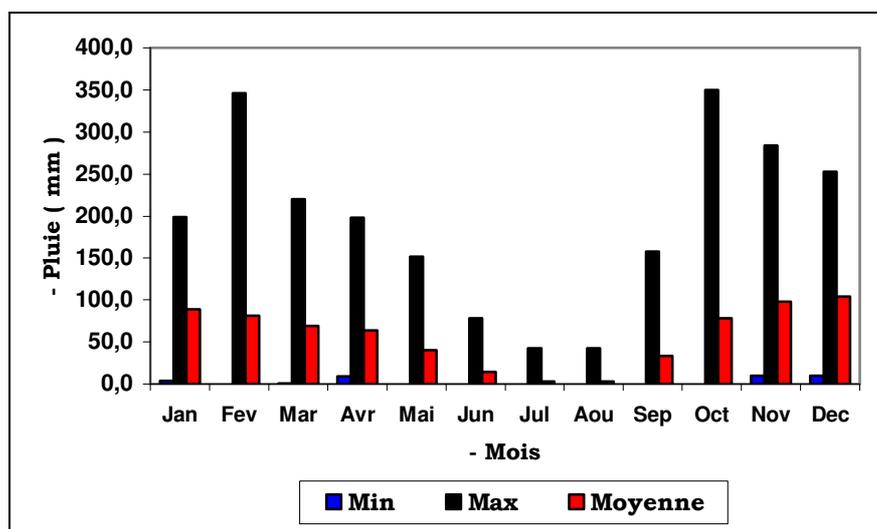


Figure 27 : Précipitation mensuelle
(Station ONM Dar El Beida : Période 1952 - 2004)

Le graphique (Figure 27) montre que les précipitations sont irrégulières et variables.

- Les précipitations Maximales atteignent une valeur maximale de 349.8 mm le mois d'Octobre.
- Les précipitations moyennes varient entre 0.0 mm et 103.9 mm respectivement pour les mois de Juillet - Août et Décembre.
- Les précipitations minimales enregistrées ont une valeurs maximale de 10.0 mm le mois de Novembre.

Le tableau ci – dessous nous résume les différentes valeurs des précipitations enregistrées pour la série climatique 1952 – 2004 :

Tableau 11 : Valeurs moyennes, maximales et minimales des précipitations mensuelles.

Pluie	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Année
Min	3.7	0.3	0.5	9.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	9.9	0.0
Max	198.7	346.1	219.9	198.1	151.7	78.2	42.3	42.3	158.0	349.8	284.2	253.0	349.8
Moyenne	88.9	81.4	68.8	63.7	40.6	14.7	3.4	3.4	33.4	78.0	98.2	103.9	56.5

f.- L'évapotranspiration de référence (ETo) :

Les valeurs des ETo ont été calculées à l'aide d'un logiciel qui a été élaboré par *Mailhol* (Cemagref, Montpellier). La formule utilisée est celle de Penman prenant en considération les valeurs journalières moyennes de la température de l'air, de l'humidité, de la vitesse du vent et de la durée d'insolation.

Le graphique ci-après représente l'évolution des ETo moyennes mensuelles de la série climatique 1952 – 2004 :

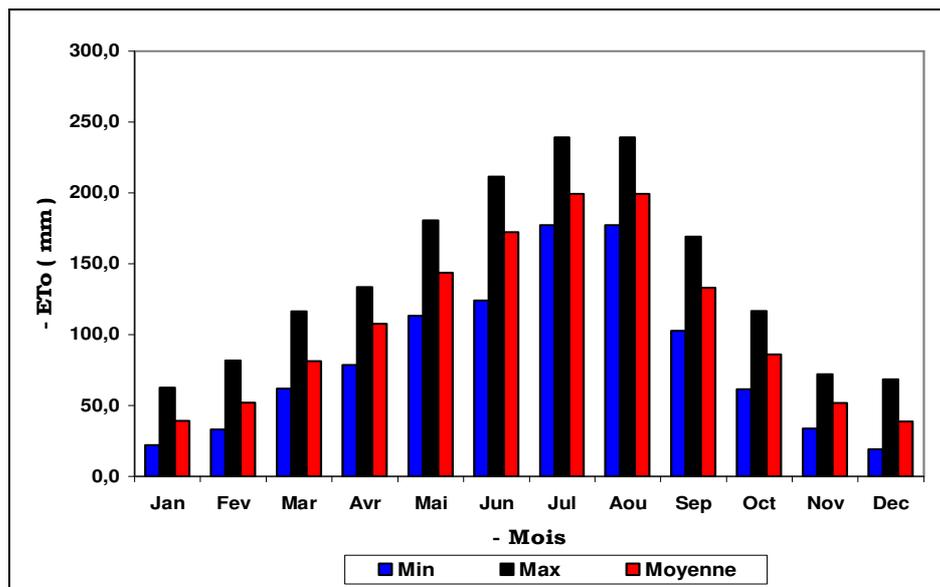


Figure 28 : Evapotranspiration Penman mensuelle
(Station ONM – Dar El Baida, Période 1952 – 2004)

Du graphique nous pouvons constater que les ETo minimales, moyennes et maximales augmentent progressivement à partir du mois de Janvier jusqu'à atteindre les valeurs maximales suivantes durant les mois de Juillet et Août :

- 239.1 mm pour les ETo maximales.
- 199.3 mm pour les ETo moyennes.
- Et 177.3 mm pour les ETo minimales.

Les ETo diminuent, par la suite, jusqu'aux valeurs de 62.7 mm le mois de Janvier, 19.3 mm le mois de Décembre et 38.9 mm en Décembre respectivement pour les ETo maximales, minimales et moyennes calculées. Les valeurs des ETo moyennes mensuelles (maximales, minimales et moyennes) obtenues pour la série climatique 1952 – 2004 sont présentées dans le tableau 12 suivant :

Tableau 12 : Valeurs des ETo minimales, maximales et moyennes (mm) .

Eto	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Année
Min	22.0	33.2	61.9	78.8	113.2	124.3	177.3	177.3	102.8	61.5	33.8	19.3	19.3
Max	62.7	81.8	116.3	133.6	180.7	211.7	239.1	239.1	169.2	116.7	71.9	68.7	239.1
Moyenne	39.3	52.3	81.6	107.6	143.7	172.4	199.3	199.3	133.1	85.9	51.6	38.9	108.8

g.- Le déficit climatique « P – Eto » :

Le graphique ci-après représente l'évolution des déficits climatiques « P-Eto » mensuelles déduits de la série climatique 1952 – 2004 :

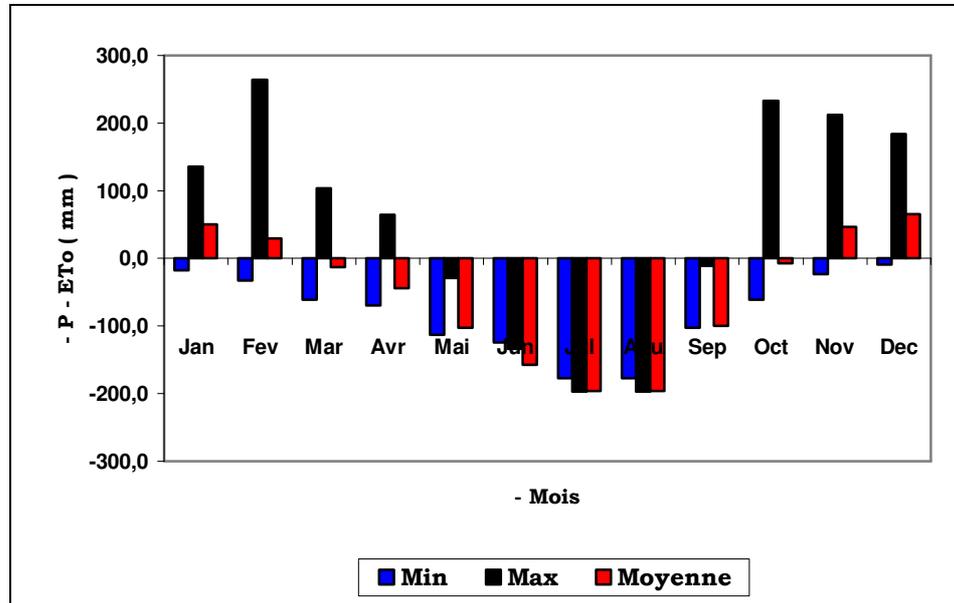


Figure 29 : Déficits « P – ETo » mensuel
(Station ONM – Dar El Baida, Période 1952 – 2004)

Le graphique ci-dessus montre que l'évolution du déficit pluviométrique qui s'est manifesté d'une manière importante à partir du mois de Mars jusqu'au mois de Septembre où la demande climatique dépasse largement les précipitations. Les valeurs maximales atteintes durant ces mois déficitaires sont :

- -196.8 mm pour les « P – ETo » maximales.
- -195.9 mm pour les « P – ETo » moyennes.
- Et -177.3 mm pour les « P – ETo » minimales.

Les valeurs des « P – ETo » moyennes mensuelles (maximales, minimales et moyennes) obtenues pour la série climatique 1952 – 2004 sont présentées dans le tableau 13 suivant :

Tableau 13 : Valeurs des « P – ETo » minimales, maximales et moyennes (mm) .

P – Eto	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Année
Min	-18.3	-32.9	-61.4	-69.7	-113.2	-124.3	-177.3	-177.3	-102.8	-61.5	-23.8	-9.4	-177.3
Max	136.0	264.3	103.6	64.5	-29.0	-133.5	-196.8	-196.8	-11.2	233.1	212.3	184.3	264.3
Moyenne	49.5	29.1	-12.8	-44.0	-103.2	-157.7	-195.9	-195.9	-99.6	-7.9	46.6	65.0	-52.2

h.- Le Rayonnement Global :

Le calcul du rayonnement global a été effectué de la même manière que les ETo en utilisant le même logiciel.

La Figure 30 représente le rayonnement global moyen mensuel de la série climatique 1952 – 2004 :

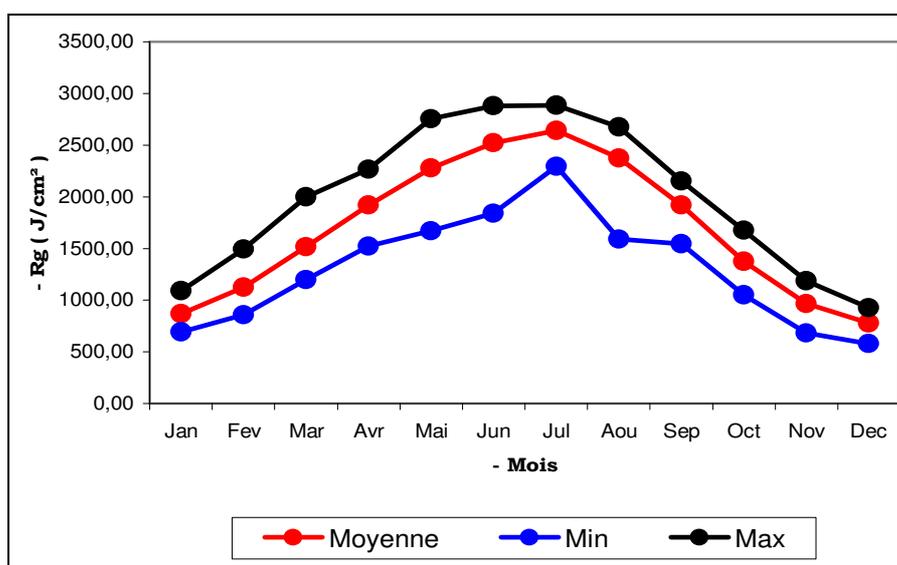


Figure 30 : Rayonnement global moyen mensuel
(Station ONM Dar El Beida : Période 1952 - 2004)

Le graphique montre que le rayonnement global (minimal, moyen et maximal) évolue en augmentant à partir du mois de Janvier jusqu'à atteindre les valeurs de 2887.54 J/cm², 2293.36 J/cm² et 2640.0 J/cm² obtenus le mois de Juillet, respectivement pour le rayonnement global maximal, minimal et moyen, puis nous notons une diminution du rayonnement jusqu'à atteindre les valeurs de 923.95 J/cm², 581.55 J/cm² et 776.35 J/cm² le mois de Décembre.

Le tableau 14 suivant récapitule les valeurs du rayonnement global moyen mensuel (maximal, minimal et moyen) obtenus pour la série climatique 1952 – 2004.

Tableau 14 : Valeurs moyennes mensuelles du Rayonnement global.

Rg	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun
Moyenne	870,6	1127,3	1518,5	1922,1	2280,0	2524,1
Min	693,2	858,0	1196,6	1520,0	1671,6	1840,5
Max	1089,6	1492,5	2001,6	2267,3	2754,6	2882,1

Rg	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Moyenne annuelle
Moyenne	2640,0	2376,1	1919,3	1373,0	965,1	776,3	1707,1
Min	2293,4	1589,0	1543,8	1052,9	680,1	581,6	1296,6
Max	2887,5	2677,8	2153,3	1676,5	1187,0	923,9	2081,3

I.2.3.- Caractéristiques pédologiques du site expérimental :

La Figure 31 représentant le site expérimental, montre que la parcelle d'étude pour les six (06) essais est composée de trois types de sols : Sol 4, Sol 5 et Sol 6 .

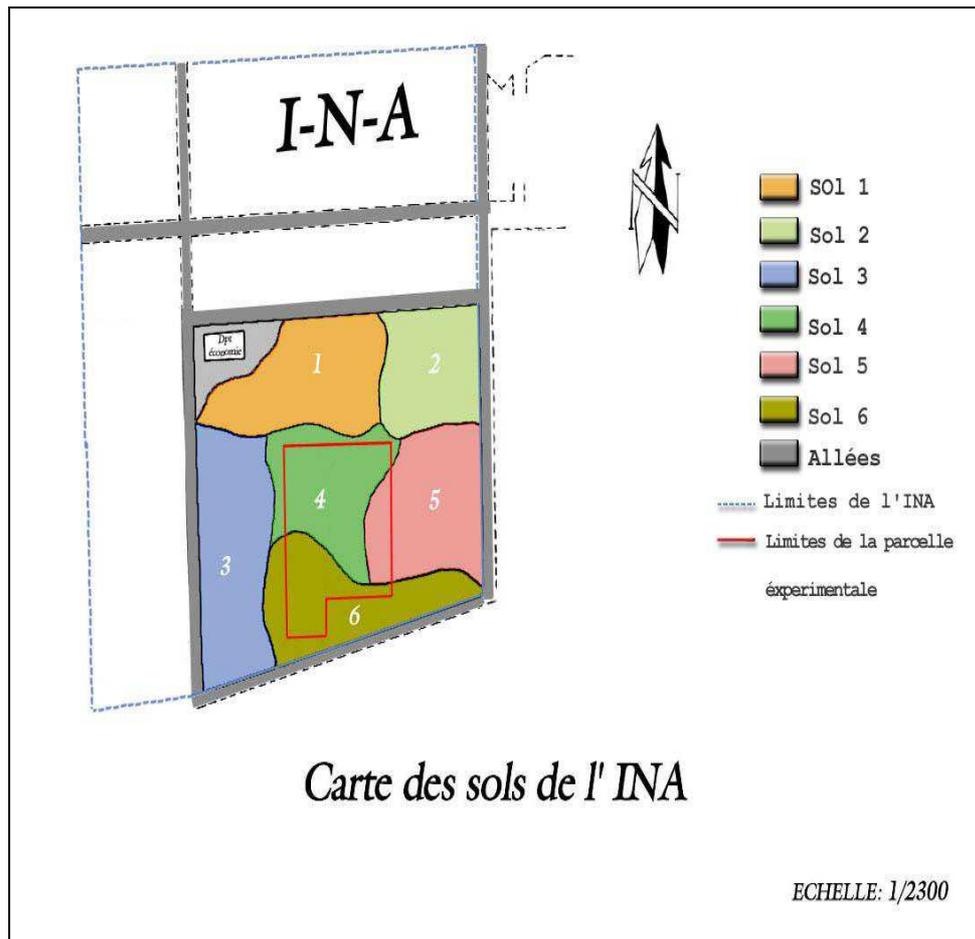


Figure 31 : Carte des sols de l'INA

La Figure 32 montre une vue globale sur la parcelle de l'INA ayant fait l'objet d'expérimentation :



Figure 32 : Parcelle expérimentale de l'INA

Le Tableau 15 résume les caractéristiques physiques et pédologiques de chaque type de sol :

Tableau 15 : Caractéristiques physiques et pédologiques de chaque type de sol :

Type de sol	Profondeur (cm)	Argile %	Limon fin %	Limon grossier %	Sable fin %	Sable grossier %	Pente (%)	Drainage	Calcaire total (%)	CE (mmhos / cm)	Ph eau	Classe texturale	Densité apparente
Sol 4	0 – 45	11.25	17.15	5.90	17.15	44.89	0.5	Bon	2.4	0.17	8.4	LS	1.69
	45 – 75	21.95	18.80	7.00	15.83	29.12							1.79
	> 75	38.85	22.15	4.30	12.61	19.60							1.63
Sol 5	0 – 20	23.00	17.90	19.77	16.40	21.87	0.5	Bon	0	0.135	8.03	L	1.39
	20 – 65	15.84	32.66	14.25	14.67	22.93							1.76
	> 100	43.71	19.04	3.65	12.83	18.53							1.44
Sol 6	0 – 15	19.10	18.65	14.32	18.00	26.17	0.5	Bon	0.23	0.17	8.08	L	1.42
	15 – 55	18.77	25.35	9.95	16.28	23.81							1.72
	> 55	34.58	18.62	14.67	11.34	16.09							1.60

Source : Abib et Haddad (1995).

CE : Conductivité électrique.

LS : Limon – Sableuse.

L : Limoneuse.

A partir du tableau ci – dessous, nous pouvons noter que les sols 5 et 6 ont une texture limoneuse ; et que le sol 4 a une texture limono – sableuse . Le pH est légèrement alcalin.

Remarque :

1.- Une actualisation des mesures des densités apparentes a été réalisé pour l'essai 2002 et a donné lieu aux résultats présentés dans le Tableau 16 pour le sol **4** et **6** contenant les différentes parcelles expérimentales :

Tableau 16 : Densité apparente (Sol **4** et Sol **6**) :

Type de sol	Sol 4	Sol 4	Sol 6	Sol 6
Profondeur (cm)	20 – 30	40 – 50	20 – 30	40 – 50
da	1.72	1.70	1.52	1.56

Source : in *Filali, 2003*

2.-Les valeurs d'entrée des modèles Bilhyna et Pilote concernant le sol sont résumés dans le Tableau 17 suivant :

Tableau 17 : Paramètres d'entrée liés au sol

Paramètres sol	Bilhyna	Pilote
Humidité en équilibre avec l'air	0.070 *	+
Humidité minimale	0.089	0.089
Humidité maximale	0.198	+
Humidité à capacité en champs	0.217	0.217
Humidité à saturation	0.287 *	+
Densité apparente	1.567 *	+
para VG alpha [m-1]	1.600 *	+
para VG n	1.310 *	+
conductivite a saturation Ks [m/s]	0.0000058 *	+
paraVG pour conductivite nK	1.310 *	+

- + : Paramètres non pris en compte par Pilote
- * : Valeurs issues de la bibliographie (*Van Genuchten*)

Les paramètres de *Van Genuchten* sont utilisés dans Bilhyna pour la résolution numérique de l'équation de Richards pour les transferts hydriques dans les couches profondes (drainage, remontées capillaires). Les simulations par Bilhyna et Pilote nécessitant un profil hydrique ou réserve en eau du sol initiale, et ne disposant pas de mesures pré expérimentales de teneurs en eau, nous avons choisi la date initiale du 21/12/1999 précédée par un épisode pluvieux allant du 09/11 au 20/12/1999 cumulant un apport pluviométrique d'environ 300 mm supposé ramener la réserve aux environs de la capacité au champs. Ainsi, nous avons adopté un profil donnant une réserve in initiale de 400 mm.

Il faut noter aussi que la manière de renseigner cette valeur diffère selon les deux modèles, en ce sens que Pilote prévoit une entrée sous forme de réserve initiale (c.a.d 400 mm) tandis Bilhyna impose une entrée sous forme de profil d'humidité dans lequel sont renseignés les épaisseurs des couches de sol ainsi que les humidités pondérales correspondantes :

Tableau 18 : Profil hydrique initial (Bilhyna)

Cotes des couches, m	Humidités initiales de chaque couche
0.10	0.200
0.15	0.205
0.20	0.208
0.30	0.210
0.40	0.215
0.50	0.216
0.60	0.217
0.70	0.217
0.80	0.217
0.90	0.217
1.00	0.217
1.20	0.217

II.- PRESENTATION DU MATERIEL VEGETAL :

En Algérie, les principales cultures céréalières sont le blé dur (*Triticum sp*) et l'orge (*Hordium sp*) qui occupaient en 1994 respectivement 22% et 14% des terres arables. Le blé dur est de loin la céréale la plus cultivée en Algérie, sa part dans l'ensemble des cultures céréalières à l'échelle nationale est en moyenne pondérée à 46.6% (1998) (*Benbelkacem et Kellou, 2000*).

La culture des céréales d'hiver demeure encore difficile à maîtriser tant que celle-ci reste confrontée et soumise à plusieurs contraintes (aléas climatiques, faible maîtrise de l'itinéraire technique, etc.), cette situation engendre une production très faible où les rendements oscille (cas du blé dur) entre 8 à 10 quintaux à l'hectare (*Aidaoui et Hartani, 2000*).

II.1.- Présentation de la culture :

La culture ayant fait l'objet de notre étude est une céréale d'hiver : le blé dur (*Triticum durum*). Deux variétés ont été utilisés durant les six (06) campagnes expérimentales :

- ❖ La variété « **Vitron** » appelée également « **Hoggar** » : est une céréale d'hiver, issue du Mexique. Elle a été introduite en Algérie à partir de l'Espagne en 1986 et a été sélectionnée par la ferme expérimentale de l'ITGC de Tiaret.
- ❖ La variété « **Simeto** » appelée aussi « **Sersou** » : elle a été introduite en Algérie à partir de l'Italie pendant ces dernières années. Elle a été sélectionnée par la ferme de l'ITGC de Tiaret. Cette variété produit un rendement d'environ 21 q / ha .

II.2.- Caractéristiques des deux variétés « **Vitron** » et « **Simeto** » :

Les principales caractéristiques de ces deux variétés de blé dur sont récapitulées dans le Tableau 19 .

Tableau 19 : Caractéristiques des deux variétés de blé dur « **Vitron** » et « **Simeto** » :

Variété	Simeto	Vitron
Origine.	Italie	Espagne
Caractéristiques morphologiques.	<ul style="list-style-type: none"> - Épi faiblement coloré, à compacité moyenne. - Paille moyenne. - Grain demi – allongé, sa coloration au phénol est faible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Épi blanc , compact avec des barbes de couleur brune à noire présentes sur tout l'épi. - Paille : demi pleine et courte , soit 90 à 100 cm de hauteur. - Grain : roux et moyen.
Caractéristiques culturales.	<ul style="list-style-type: none"> - Cycle végétatif précoce. - Tallage moyen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cycle végétatif précoce. - Tallage : moyen.
Caractéristiques à l'égard des maladies.	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible à la rouille brune, et à la sécheresse. - Tolérante à la verse. - Résistance à l'Oïdium. 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu sensible à l'heminthosporiose. - Moyennement tolérantes aux rouilles.
Caractéristiques technologiques.	<ul style="list-style-type: none"> - Qualité semoulier assez bonne. - Très bonne qualité des protéines. 	<ul style="list-style-type: none"> - Légèrement sensible au mitadinage et à la moucheture. - Poids de mille grains élevé
Productivité.	- Bonne (≈ 21 q / ha).	- Bonne
Zone d'adaptation.	/	- Toute les zones céréalières où la pluviométrie annuelle moyenne est supérieure à 400 mm.
Conseils techniques et culturales.	<ul style="list-style-type: none"> - Variété demi – alternative à semer à partir de la deuxième décade du mois de Novembre à celle de Décembre. - Tolérante aux gelées tardives, et au déficit hydrique tardif. 	<ul style="list-style-type: none"> - Période de semis :de la mi-novembre à la fin décembre. - Densité de semis : 120 à 150 kg/ha.

Source : *ITGC, 1994*

II.3.- Exigences en eau des cultures :

Les exigences en eau correspondant à de bons rendements pour la culture du blé dur, sont de 450 à 650 mm selon le climat et la longueur du cycle végétatif. (in *Filali, 2003*).

Le coefficient cultural « Kc » qui met en relation l'évapotranspiration maximale « ETM » et l'évapotranspiration de référence « ETo » et dont l'équation a déjà été citée dans la partie bibliographique, varie en fonction des différents stades physiologiques de la culture. Le Tableau 20 suivant résume les différentes valeurs du coefficient cultural du blé dur, conseillées par la FAO.

Tableau 20 : Évolution des coefficients culturaux « Kc » pendant le cycle végétatif du blé :

Stade	Kc Blé
Période végétative	0,3
Montaison	0,7
Gonflement	0,8
Epiaison	1,05
Floraison	1,2
Grain laiteux	0,75
Grain pâteux	0,65
Maturation	0,25

Source : in *Filali, 2003*

II.4.- Mise en place de la culture :

Toutes les parcelles expérimentales sur lesquelles se sont déroulées les différentes études (de l'essai 2000 jusqu'à l'essai 2005), ont été occupées à chaque fois par un précédent cultural qui est la culture de blé dur dans ses deux variétés. Pour les essais 2000, 2001, 2002, 2003 et 2004 : c'était la variété « *Vitron* » ; et pour l'essai 2005 la variété « *Simeto* ».

II.4.1.- Préparation du lit de semis :

En vue de l'amélioration des caractéristiques physiques du sol, plusieurs opérations culturales avant le semis ont été effectuées pour

chaque essai. Le Tableau 21 résume ces différentes opérations de travail du sol.

Tableau 21 : Les différentes opérations culturales avant semis.

Essai	Type de travail du sol	Outils
2000	- Pseudo – labour. - Façons superficielles.	- Chisel. - Cultivateur à dents.
2001	- Charrue à socs, Cover – Crop et Rouleau. - Charrue à socs, Cultivateur à dents et Rouleau.	
2002	- Labour. - Pseudo – labour. - pseudo – labour. - Passage par cover – crop.	- Cultivateur à dents rigides. - chisel. - cultivateur à dents flexible.
2003	- Façons superficielles.	- Cover – Crop
2004	- Déchaumage. - Labour. - Façons superficielles. - Apports phosphorique (TSP)	- Cultivateur à dents rigides. - Charrue à socs. - Cultivateur à dents flexibles. - Cover – crop. - Epandeur d’engrais.
2005	- Labour. - Pseudo – labour. - Façons superficielles.	- Cultivateur à dents rigides. - Chisel. - Cultivateur à dents. - Cover – crop.

II.4.2.- Date et dose de semis :

Le semis a été réalisé à l'aide d'un semoir en ligne sans aucune pré – irrigation. Le Tableau 22 récapitule les différentes dates et doses de semis durant toutes les périodes expérimentales (de 2000 à 2005).

II.4.3.- Fertilisation :

La fertilisation a été apportée avant et après l'installation de la culture pour chacun des essais expérimentaux. Les différents apports de fumure apportés durant les six (06) campagnes sont :

- Fumure de fond à l'aide d'un épandeur horizontal.
- Fertilisation azotée (Urée) en utilisant un épandeur.
- Fertilisation foliaire à l'aide d'un pulvérisateur.

II.4.4.- Désherbage :

Le désherbage qui a été employé durant les six (06) essais expérimentaux pour la culture de blé dur est un désherbage chimique en utilisant un pulvérisateur.

II.4.5.- Traitements phytosanitaires :

Au cours des différentes expérimentations, il y a eu l'apparition de symptômes de quelques maladies telles que la « Rouille » sur les feuilles, ainsi que l'attaque des cultures par les insectes tels que les « pucerons » et les « fourmis ». On a, donc, effectué des traitements fongicide et insecticide qui ont permis de bloquer le développement des maladies. Le Tableau 23 ci – après présente les différents traitements phytosanitaires qui ont été effectués durant les différents essais.

II.4.6.- Récolte :

Une fois que la culture de blé a atteint le stade de maturité on a procédé à la récolte qui a été réalisée à l'aide d'une moissonneuse batteuse. Le Tableau 22 ci – après nous donne les différentes dates de récolte pour les différents essais.

Tableau 22 : Les différentes dates de semis, doses de semis et de récolte.

Essai	Culture	Variété	Date de semis	Dose de semis (q/ha)	Récolte
2000	Blé dur (<i>Triticum durum</i>)	« Vitron »	28/12/1999	/	PLU – SEV : 16/06/2000 ETM : 09/06/2000 MOD :28/05/2000
2001			19/12/2000	/	- 30/05/2001
2002			12/01/2002	2	- 30/05/2002
2003			05/01/2003	1.5	- 30/05/2003
2004		« Simeto »	06/12/2004	1.6	- 27/06/2004
2005			11/01/2005	1.6	- 12/06/2005

Tableau 23 : Les différents traitements phytosanitaires effectués durant les campagnes de 2000 à 2005.

Essai	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Traitements phytosanitaires	- Insecticide total (<i>Pythlorex</i>), Le 09/04/2000.	- Insecticide total (<i>Pythlorex</i>), Le 02/04/2001.	/	/	- Fongicide : <i>Tilt</i> - Insecticide : <i>Pythlorex</i> Le 11/02/2004	- Insecticide : <i>Pythlorex</i> Le 20 et 27 / 04 / 2005

Les paramètres d'entrée des modèles Bilhyna et Pilote liés à la culture sont résumés dans le Tableau 24 suivant :

Tableau 24 : Paramètres d'entrée liés à la plante

Paramètres plante	Bilhyna	Pilote
Hauteur de végétation, m	0.90	0.90
profondeur max des racines, m	1.20	1.20
LAI max	7.0	7.0
Cumul des T°C.jour du semis à la récolte	2100	2100

III.- PROTOCOLES EXPERIMENTAUX :

Nous rappelons que les différentes campagnes d'essais ont pour buts l'étude des cinétiques hydrique et de croissance de la culture du blé dur dans le contexte de la Mitidja et ce sous des régimes hydriques différents. L'idée était de considérer deux régimes hydriques extrêmes, l'un pluvial soumis aux conditions naturelles et l'autre irrigué fréquemment de façon à assurer à la culture un confort hydrique tout le long de la période végétative. En plus de ces deux régimes " témoins ", nous avons inséré deux autres traitements intermédiaires ayant fait l'objet de quelques irrigations ponctuelles à certains stades végétatifs jugés sensibles au stress hydrique.

C'est ainsi que, globalement, les traitements hydriques utilisés ont été appelés :

- *Traitement ETM : Traitement irrigué fréquemment*
- *Traitement PLU : Traitement témoin pluvial*
- *Traitement MOD : Traitement à un stress "modéré"*
- *Traitement SEV : Traitement à un stress "sévère"*

Notons enfin qu'en raison de certaines contraintes matérielles liées au système d'irrigation (aspersion) , ce schéma n'a pu être réalisé que pour les années 2000, 2001 et 2002 , les autres campagnes 2003, 2004 et 2005 n'ayant fait l'objet que des traitements pluviaux.

III.1. Dispositifs expérimentaux :

Les dispositifs expérimentaux adoptés pour la majeure partie des essais sont de type " Blocs Aléatoires Complets " avec les modalités suivantes (du moins en ce qui concerne les essais 2000 à 2002) :

- Nombre de blocs = 3
- Facteur d'étude : Régime hydrique avec 4 niveaux :
 - ✿ Niveau 1 : Traitement ETM
 - ✿ Niveau 2 : Traitement MOD
 - ✿ Niveau 3 : Traitement SEV
 - ✿ Niveau 4 : Traitement PLU

Ce schéma a donné lieu à la confection de 12 (4x3) parcelles élémentaires dont les dimensions étaient variables selon les essais (Tableau 25) :

Tableau 25 : Superficies (m²) des parcelles expérimentales.

ESSAI	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Superficie	6000	6000	552	4900	1650	2304

Notons que la technique d'irrigation utilisée était l'aspersion et que les doses étaient calculées généralement en fonction des coefficients culturaux Kc du blé pour la période considérée ainsi que la demande climatique représentée par l'ETP Penman, selon la formule :

$$ETM = Kc \cdot ETP \dots\dots\dots (65)$$

Nous résumons dans le Tableau 26 les dates et doses des apports d'eau d'irrigation pour les différents traitements hydriques des campagnes d'essais.

Tableau 26 : dates et doses (mm) d'irrigation des trois (03) essais :

Essai	Date	ETM	MOD	SEV
2000	20/02/2000	27	27	27
	07/03/2000	11	47	
	22/03/2000	15		
	28/03/2000			40
	28/03/2000	17		
	08/04/2000	26		
	15/04/2000	16		
	22/04/2000	36	40	
	30/04/2000	35		
	06/05/2000	29		
	13/05/2000	25		
	TOTAL	237	114	67
2001	10/03/2001	23		
	20/03/2001	17		
	30/03/2001	25	55	
	10/04/2001	30		85
	21/04/2001	20		
	TOTAL	115	55	85
2002	23/03/2002	16		
	01/04/2002	18		
	10/04/2002	18		
	17/04/2002		50	
	19/04/2002	11		
	28/04/2002	45	45	
	29/04/2002			45
	10/05/2002	20	20	
	11/05/2002			20
	TOTAL	128	115	65

III.2.- Système d'irrigation :

Le système d'irrigation qui a été utilisé dans les différents Protocoles expérimentaux (2000, 2001, et 2002) est l'irrigation par aspersion, qui consiste en un apport d'eau artificiel sous forme de pluie (Figure 33).

Ce système était composé de ce qui suit :

- ❖ Une station de pompage, comprenant :
 - Une vanne principale d'alimentation.
 - Une pompe centrifuge monocellulaire (type CM 40-250 B, $Q(l/mm)=150 -170$).
 - Un moteur électrique (2900 trs/mn).

- Un manomètre (10 bars).
- Une vanne de distribution.
- Un bassin de réserve (de dépannage 6 m³).
- ❖ Une conduite principale (diamètre : 80 cm).
- ❖ Des conduites secondaires (diamètre : 60 cm).
- ❖ Des rampes portes – asperseurs (diamètre : 60 cm).
- ❖ Des asperseurs.
- ❖ Quelques accessoires (réducteurs, les T, les coudes ...).

La pression de service pendant les irrigations était de 10 bars pour les essais 2000 et 2001 et de 4 bars pour l'essai 2002, avec une pluviométrie horaire d'environ 7 – 8 mm .



Figure 33 : Système d'irrigation par aspersion

III.3.- Mesures effectuées :

Plusieurs mesures ont été effectuées lors de chaque campagne de 2000 à 2005. Nous nous sommes intéressés, essentiellement, dans cette étude aux mesures suivantes :

- *La cinétique hydrique.*
- *Mesures climatiques.*
- *Mesures phytotechniques.*

III.3.1.- La cinétique hydrique :

Dans le but de déterminer la teneur en eau du sol, une série de mesures a été effectuée durant chaque protocole expérimental, et ceci en ayant recours soit à la méthode gravimétrique (essais : 2000, 2001, 2002, 2004 et 2005), soit la méthode neutronique (essais 2001, 2003).

La méthode gravimétrique consiste à effectuer des prélèvements du sol à l'aide d'une tarière à différentes profondeurs (généralement allant de

10 à 100 cm), et ensuite les peser avant et après passage à l'étuve pendant 24 heures à 105°C. L'humidité pondérale « Hp » est donc calculée en utilisant l'équation suivante :

$$H_p = \frac{PH - PS}{PS} * 100 \dots\dots\dots (66)$$

Avec :

- Hp : humidité pondérale en (%) ;
- PH : poids frais de l'échantillon (g) ;
- PS : poids sec de l'échantillon (g).

Les valeurs de cette humidité pondérale nous permettent d'estimer l'humidité volumique « θ_v » comme suit :

$$\theta_v = H_p \cdot d_a \dots\dots\dots (67)$$

Où : « da » est la valeur de la densité apparente.

Nous pouvons, donc, déterminer le stock d'eau à différentes profondeurs en utilisant l'équation suivante :

$$S = \int_0^z \theta_v \cdot dz \dots\dots\dots (68)$$

Avec :

- S : Stock d'eau (mm).
- z : Profondeur de l'horizon envisage (mm).
- θ_v : teneur en eau volumique.

D'autre part, et dans le but de cerner les valeurs des humidités, la parcelle à fait l'objet d'un protocole (essai 2005) de détermination des valeurs seuils des humidités qui ont aboutit à ce qui suit :

- Teneur en eau à « *Capacité au Champ* » : $R_{cc} = 340$ mm/m.
- Teneur en eau *maximale* : $R_{max} = 310$ mm/m.
- Teneur en eau au « *Point de Flétrissement* » : $R_{pf} = 140$ mm/m.

Ces valeurs conduisent à une réserve utile de : $RU = 200$ mm/m.

III.3.2.- Mesures climatiques :

Les données climatiques nécessaires à notre étude (calculs des ETO, simulations des bilans hydriques par Bilhyna et Pilote) ont été

recueillies de la Station ONM de Dar El Beida et ont porté sur les paramètres journaliers suivants :

- *La température de l'air.*
- *L'humidité de l'air.*
- *La vitesse du vent.*
- *La durée d'insolation.*
- *Les précipitations*

Les deux autres paramètres (ETo et Rayonnement global) ont fait l'objet de calculs par la formule de Penman-Monteith.

III.3.3.- Mesures phytotechniques.

Pratiquement toutes les campagnes d'essais ont fait l'objet de mesures sur les paramètres suivants liés à la croissance de la culture :

- *Les stades phénologiques.*
- *L'enracinement.*
- *L'indice foliaire « LAI ».*
- *La température du couvert végétal.*
- *Le potentiel foliaire.*
- *La teneur en eau relative.*
- *Les rendements en grains et leurs composantes.*

Nous notons que nous ne prendrons pas en compte dans nos analyses les facteurs physiologiques (Température de surface du couvert, Potentiel foliaire et Teneur en eau relative), lesquels paramètres ayant fait l'objet de travaux de thèse antérieurs.

➤ Suivi des différents stades phénologiques :

Durant les différents essais expérimentaux et après le semis, le suivi du cycle de développement de la culture de blé dur a permis de noter les différents stades phénologiques qui l'ont caractérisés. Ce suivi a été mené de façon régulière depuis la levée jusqu'à la maturité physiologique des plantes. Les dates des différents stades phénologiques de la culture de blé dur sont résumées dans le tableau 27 :

Tableau 27 : Les différents stades phénologiques .

Dates et JAS												
Essai	2000		2001		2002		2003		2004		2005	
Stades	Date	JAS	Date	JAS	Date	JAS	Date	JAS	Date	JAS	Date	JAS
Semis	28/12/1999	0	19/12/2000	0	12/01/2002	0	05/01/2003	0	06/12/2003	0	11/01/2005	0
1 feuille	09/01/2000	12	06/01/2001	18	26/01/2002	14	12/01/2003	12	20/12/2003	14	05/02/2005	25
2 feuilles	19/01/2000	22	13/01/2001	25	02/02/2002	21	14/01/2003	14	22/12/2003	16	/	/
3 feuilles	25/01/2000	28	20/01/2001	32	05/02/2002	24	21/01/2003	21	31/12/2003	25	15/02/2005	35
Début tallage	31/01/2000	34	30/01/2001	42	15/02/2002	34	01/02/2003	30	15/01/2004	40	05/03/2005	53
Plein tallage	16/02/2000	50	12/02/2001	55	24/02/2002	44	/	/	04/02/2004	60	24/03/2005	72
Montaison	05/03/2000	68	03/03/2001	74	18/03/2002	65	14/02/2003	44	07/03/2004	92	10/04/2005	89
Gonflement	28/03/2000	91 PLU – SEV	20/03/2001	91	26/03/2002	73	20/03/2003	78	18/03/2004	103	/	/
	01/04/2000	95 MOD - ETM										
Epiaison	05/04/2000	99 PLU-SEV	30/03/2001	101	04/04/2002	82	26/03/2003	84	03/04/2004	119	20/04/2005	99
	11/04/2000	105 MOD-ETM										
Floraison	14/04/2000	108 PLU-SEV	07/04/2001	109	10/04/2002	88	/	/	11/04/2004	127	05/05/2005	114
	18/04/2000	112 MOD										
	29/04/2000	123 ETM										

Dates et JAS												
Essai	2000		2001		2002		2003		2004		2005	
Stades	Date	JAS	Date	JAS	Date	JAS	Date	JAS	Date	JAS	Date	JAS
Grain laiteux	20/04/2000	114 PLU-SEV	21/04/2001	123	28/04/2002	106	/	/	24/04/2004	140	18/05/2005	127
	22/04/2000	116 MOD										
	03/05/2000	127 ETM										
Grain pâteux	04/05/2000	128 PLU-SEV	29/04/2001	131	06/05/2002	114	19/05/2003	121	11/05/2004	157	24/05/2005	133
	05/05/2000	129 MOD										
	18/05/2000	142 ETM										
Maturation	15/05/2000	139 PLU-SEV	21/05/2001	153	12/05/2002	120	/	/	12/06/2004	186	/	/
	27/05/2000	151 MOD										
	08/06/2000	163 ETM										
Récolte	16/05/2000	140 PLU-SEV	30/05/2001	162	30/05/2002	138	30/05/2003	132	27/06/2004	204	18/06/2005	158
	28/05/2000	152 MOD										
	09/06/2000	164 ETM										

➤ **Mesure de l'évolution de l'enracinement :**

Le suivi de l'évolution du système racinaire a été réalisé pour les essais 2000, 2001, 2002 et 2004; et durant tout le cycle de développement du végétal. Des fosses de 1.5 m de profondeur ont été creusés permettant une observation visuelle de la croissance racinaire. La Figure 34 représente une fosse réalisée lors d'un protocole expérimental (essai 2004), qui a permis le suivi de l'évolution de l'enracinement. Les résultats obtenus sont représentés dans les figures n° 35 et 36 ci-dessous.



Figure 34 : Fosse réalisée pour le suivi de l'évolution de la profondeur racinaire (*Essai 2004*)

L'évolution de la profondeur racinaire a été suivi pour les deux traitements : ETM et PLU pour les essais 2000, 2001 et 2002 (Figure 35). L'essai 2004 a fait l'objet, seulement, d'un traitement pluvial (Figure 36).

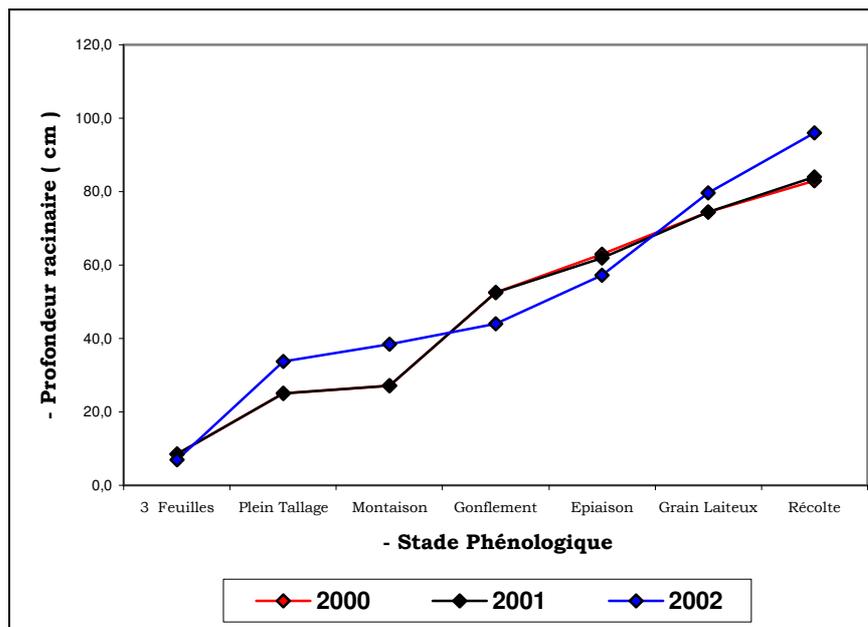


Figure 35 : Evolution de la profondeur racinaire (Traitements Irrigués 2000, 2001 et 2002)

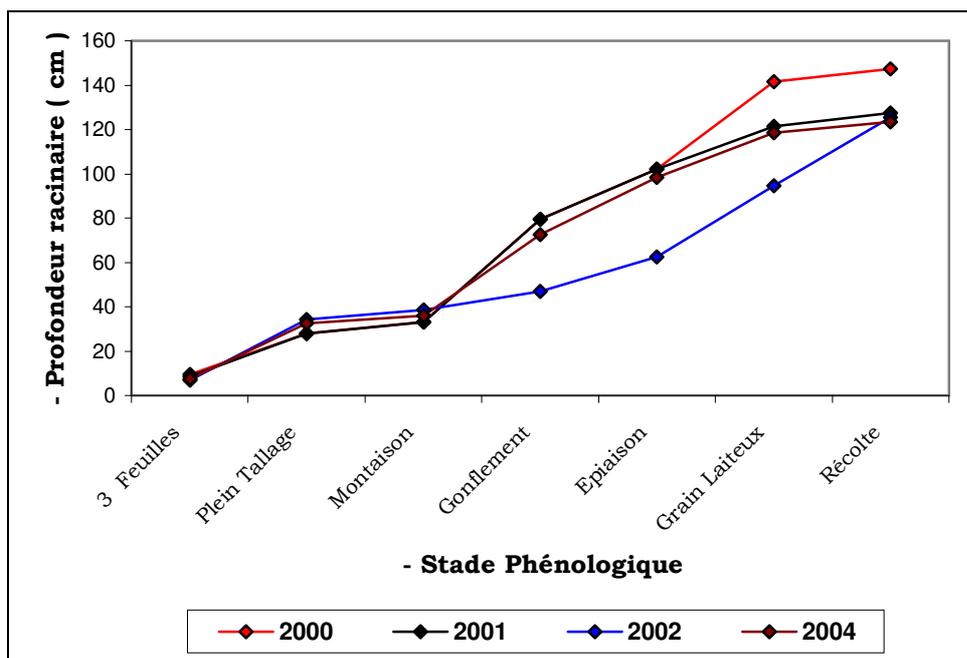


Figure36 : Evolution de la profondeur racinaire (Traitements Pluviaux 2000, 2001, 2002 et 2004)

Des deux graphes, nous pouvons constater que les racines se développent en même temps que la partie aérienne du végétal. Cependant, leur vitesse d'accroissement est plus importante pour les

traitements non irrigués (PLU) que pour les traitements irrigués (ETM) voir Tableau 28.

Tableau 28 : Valeur maximale de la profondeur racinaire.

	Essai 2000		Essai 2001		Essai 2002		Essai 2004
	PLU	ETM	PLU	ETM	PLU	ETM	PLU
Profondeur maximale (Px en cm)	147.4	83.0	127.4	84.0	125.4	96.0	123.5

Cette différence de la croissance du système racinaire entre les deux traitements PLU et ETM, s'explique par le fait que les racines dans le cas du traitement PLU se prolongent beaucoup plus dans le but d'atteindre des zones du sol plus humides.

➤ **Mesure de l'indice foliaire « LAI » (Leaf Area Index) :**

Le suivi de l'évolution de l'indice de surface foliaire a été mené pour chaque essai et durant différents stades de développement de la culture de blé dur.

Des prélèvements de plants ont été effectués au niveau de chaque parcelle (pour chaque essai) et ont permis de mesurer la longueur « L » et la largeur « l » de chaque feuille se trouvant sur chaque plant pour pouvoir calculer la surface des feuilles (chaque feuille) en utilisant l'équation suivante :

$$S = (L * l) / 2 \dots\dots\dots (69)$$

Où :

L : la longueur de la feuille en cm.

l : la largeur de la feuille en cm.

En supposant que la forme des feuilles a été assimilée à une forme triangulaire.

Le calcul du « LAI » est fait en appliquant la formule suivante :

$$\boxed{\text{LAI} = S / s} \dots\dots\dots (70)$$

Avec :

- **S** : Surface foliaire en m².
- **s** : Surface de la placette échantillonnée en m².

Les principaux résultats de mesure obtenus du « LAI » sont récapitulés dans le Tableau 29 ci – après.

Il est à noter que le paramètre « LAI » est une donnée d'entrée importante des deux modèles « Pilote » et « Bilhyna » qui requièrent une valeur maximale du LAI.

Tableau 29 : Les différents résultats de mesure du LAI.

		LAI												
Traitement		Essai 2000				Essai 2001				Essai 2002				Essai 2004
Stade phénologique		ETM	PLU	MOD	SEV	ETM	PLU	MOD	SEV	ETM	PLU	MOD	SEV	PLU
Montaison		2.19	1.08	1.02	2.71	4.74	4.74	4.42	4.05	4.8	4.82	4.06	5.07	4.03
Gonflement		6.44	5.89	6.22	5.85	6.14	6.44	5.86	5.18	5.71	6.21	5.84	5.5	6.55
Epiaison		6.22	3.04	6.66	5.11	6.99	7.05	6.77	6.61	/	/	/	/	6.08
Floraison		3.12	2.75	3.12	4.2	5.24	3.87	4.87	3.88	6.02	5.51	4.94	3.26	5.29
Grain Laiteux		1.47	0.99	1.8	3.99	2.81	1.12	2.11	1.76	2.62	2.62	2.56	2.55	/

➤ **Mesure du rendement en grain :**

La récolte a été effectuée pour tous les essais suivant les dates qui ont été présentées précédemment dans le Tableau 30.

En ce qui concerne le calcul du rendement, on a utilisé l'équation suivante :

$$\mathbf{Rdt (T / ha) = Rdt (gr / m^2) / 100} \quad \dots (71)$$

Avec :

Rdt (gr/m²) = (nombre d'épis/m²) x (nombre de grain/épi) x poids de grains (gr).

Les résultats de calcul du rendement pour les différentes campagnes sont résumés dans le tableau qui suit :

Tableau 30 : Rendements mesurés (T/ha) durant les campagnes expérimentales.

Traitements	2000	2001	2002	2004	2005
ETM	6,3	8,3	7,2	-	-
MOD	2,7	4,6	4,2	-	-
PLU	0,8	4,8	3,4	6,6	4,0
SEV	3,5	4,4	3,8	-	-

Partie III :
Résultats et Interprétations

INTRODUCTION :

Cette partie sera consacrée à l'interprétation des résultats obtenus durant notre présent travail.

Nous rappelons que l'objectif principal de notre travail consiste à utiliser deux modèles de simulation de bilan hydrique, Bilhyna et Pilote qui constituent deux approches différentes tant dans leur conception de la cinétique hydrique du sol que dans celle de la croissance végétale.

En premier lieu nous avons essayé de donner un aperçu sur les caractéristiques climatiques expérimentales en comparaison avec une série climatique allant de 1953 jusqu'à 2005 ainsi que les valeurs issues d'une analyse fréquentielle (Probabilité de 70%).

Nous avons utilisé les modèles Pilote et Bilhyna pour tenter de valoriser les résultats des essais expérimentaux réalisés durant la période de 2000 à 2005 . Nous avons, donc, réalisé les simulations des bilans hydriques pour chaque campagne expérimentale, ces simulations ont concerné les traitements « Pluviaux », « Irrigués », « Modérés » et « Sévère » pour les protocoles de 2000 à 2002 ; et uniquement le traitement « Pluvial » des protocoles de 2003 à 2005. De plus, nous avons tenté d'effectuer un « calage » des deux modèles « Pilote et Bilhyna » qui a porté, essentiellement, sur des confrontations sur les réserves en eau du sol et les indices de surface foliaire « LAI ». Cette confrontation des résultats simulés par Pilote et Bilhyna et mesurés sur terrain a été faite pour chaque protocole expérimental.

Les deux modèles nous ont, également, permis de faire des simulations des évapotranspirations réelles « ETR » ainsi que des différents paramètres du bilan hydrique pour chaque essai et traitement hydrique.

Les deux modèles ont été aussi utilisés conjointement pour simuler des irrigations " automatiques " dans le contexte des campagnes de 2000 à 2005 . Ces simulations des irrigations permettent de faire une évaluation des régimes d'irrigation réellement gérés dans les différents essais expérimentaux .

I.- Caractéristiques climatiques expérimentales :

I.1.- La température de l'air :

La figure ci-après montre l'évolution des températures moyennes mensuelles de la série climatique allant de 1953 jusqu'à 2005 en comparaison avec celles des six (6) campagnes expérimentales :

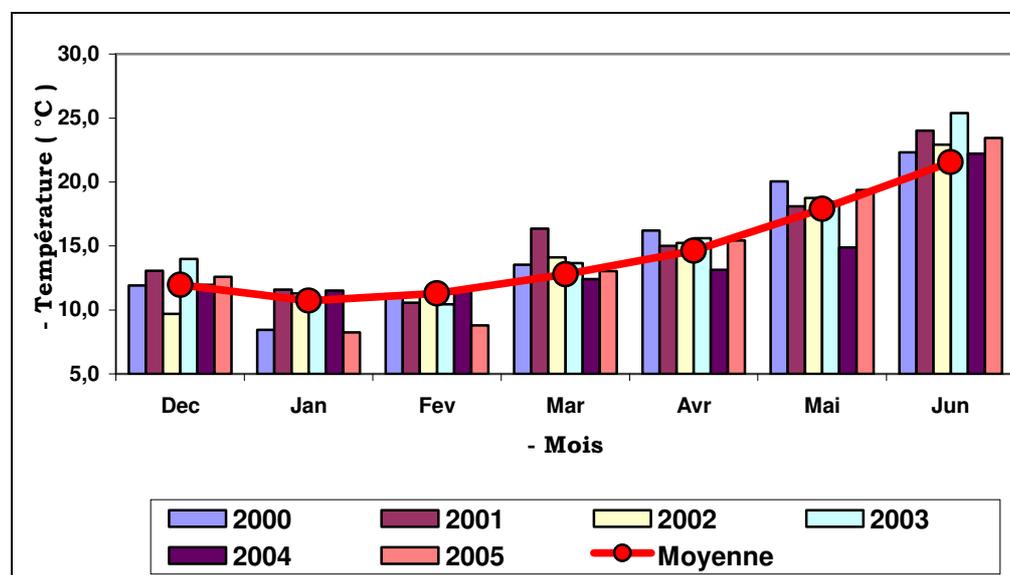


Figure 37 : Température moyenne mensuelle
(Station ONM Dar El Beida - Période 1953 - 2005)

Les températures des campagnes expérimentales 2000, 2001, 2002, 2003 et 2005 semblent s'accorder avec celles de la série climatique avec néanmoins des écarts importants pour les essais 2000 et 2005 en ce qui concerne les mois de Janvier et Février.

Les valeurs des températures moyennes extrêmes pour les campagnes expérimentales sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 31 : Valeurs extrêmes des températures moyennes mensuelles (°C) :

	Essai						Série Climat. (53-05)
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Moy.
max	22.3	24.0	22.9	25.4	22.2	23.4	21.6
min	8.4	10.6	11.1	10.5	11.5	8.2	10.7

I.2.- Humidité de l'air :

La Figure 38 suivante montre les humidités de l'air moyennes mensuelles enregistrées durant les essais expérimentaux en comparaison avec les valeurs moyennes mensuelles de la série climatique (1953–2005).

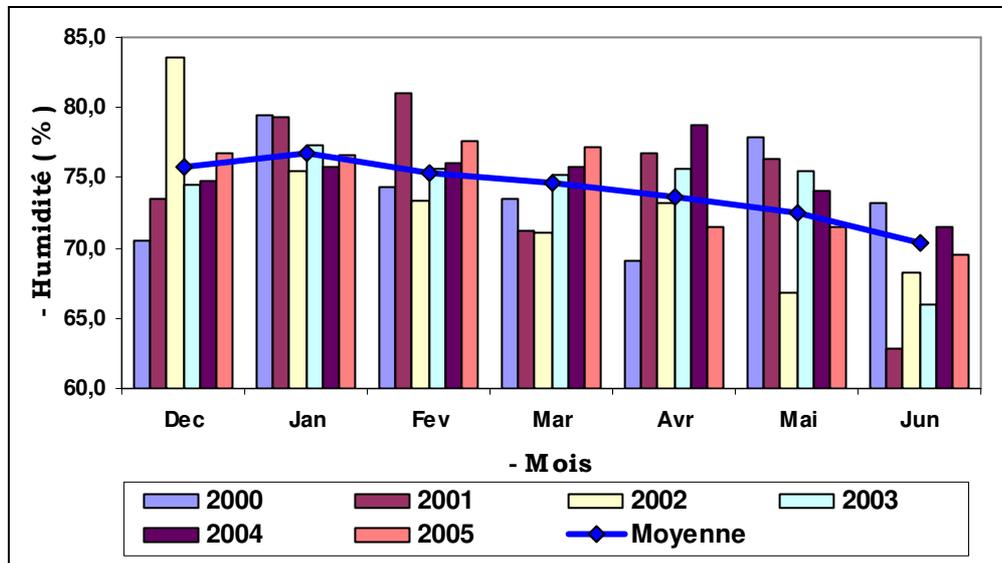


Figure 38 : Humidité moyenne mensuelle
(Station ONM Dar El Beida - Période 1953 - 2005)

On note ici de fortes variations des humidités de l'air par rapport à la moyenne de la série climatique surtout en ce qui concerne les mois les plus chauds (Mai, Juin).

Les valeurs extrêmes des humidités sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 32 : Valeurs extrêmes des humidités de l'air (%) moyennes mensuelles :

	Essai						Série Climat. (53-05)
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Moy.
max	79.5	81.1	83.5	77.3	78.8	77.6	76.7
min	69.0	62.8	66.8	66.0	71.5	69.6	70.4

I.3.- Vitesse du vent :

Le graphique ci – dessous représente les vitesses du vent moyennes mensuelles enregistrées durant les six (6) essais en comparaison avec celles de la série climatique (1953–2005) :

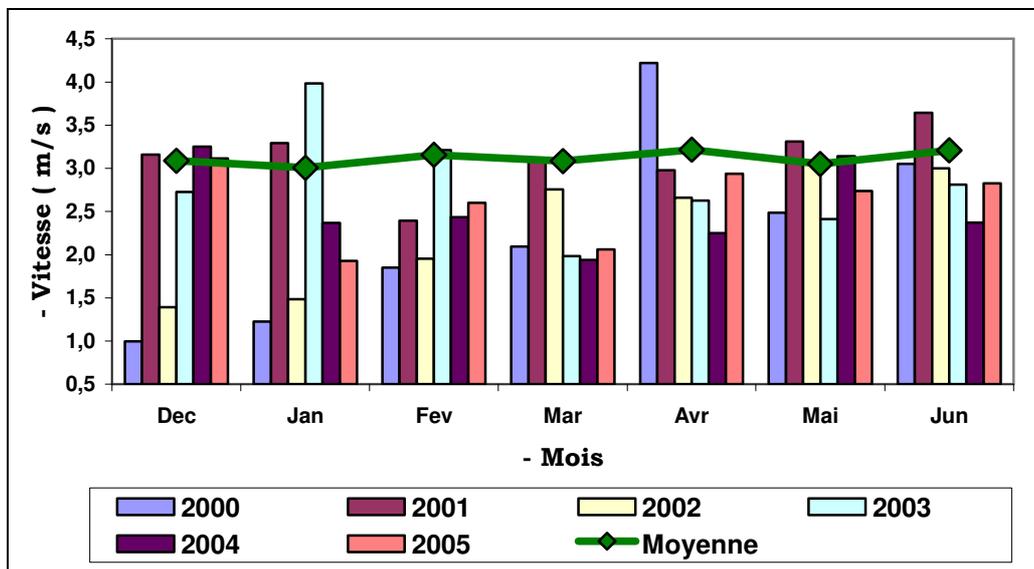


Figure 39 : Vitesse du vent moyenne mensuelle
(Station ONM Dar El Beida - Période 1953 - 2005)

Le graphique montre une grande variabilité de la vitesse du vent avec des écarts importants entre les six essais expérimentaux. La courbe moyenne de la série climatique (1953–2005) ne s'accorde pas totalement avec celles des essais. Les valeurs extrêmes de la vitesse du vent sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 33 : Valeurs extrêmes de la vitesse du vent (m/s) moyennes mensuelles.

	Essai						Série Climat. (53-05)
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Moy.
Max	4.2	3.6	3.1	4.0	3.3	3.1	3.2
Min	1.2	2.4	1.5	2.0	1.9	1.9	3.0

I.4.- Durée d'insolation :

Le graphe (Figure 40) montre l'évolution des durées d'insolation moyennes mensuelles enregistrées durant les six (6) campagnes expérimentales en comparaison avec celle de la série climatique (1953-2005) :

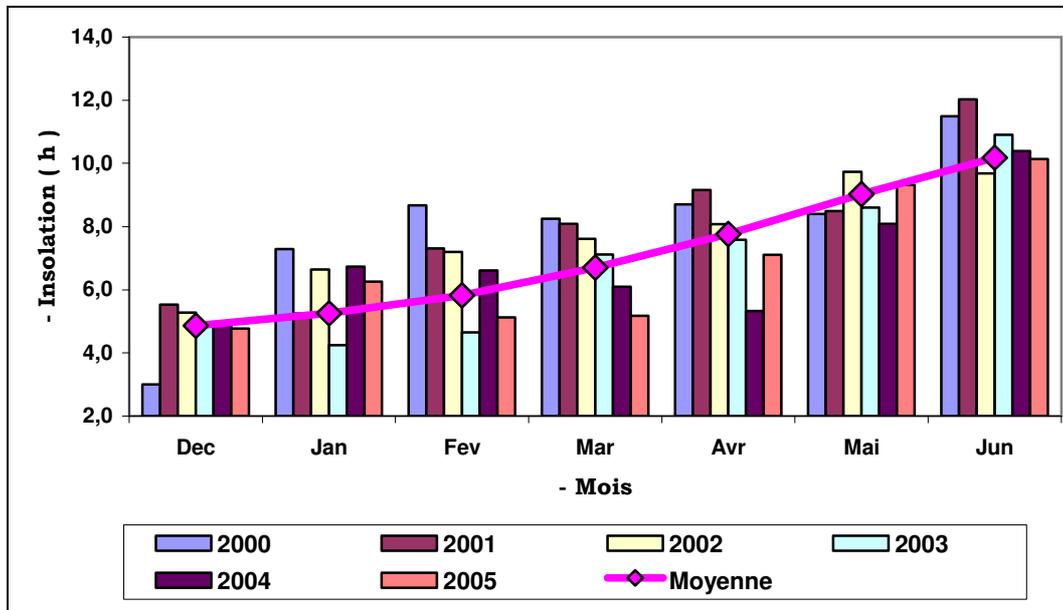


Figure 40 : Durée d'insolation moyenne mensuelle
(Station ONM Dar El Beida - Période 1953 - 2005)

Nous remarquons qu'il y a une variabilité importante des valeurs de la durée d'insolation entre les différents essais avec des écarts importants par rapport aux valeurs de la série climatique. Les valeurs de la durée d'insolation pour les essais 2002 et 2003 semblent s'approcher de celles de la série climatique (1953-2005). Les valeurs extrêmes de la durée d'insolation moyennes mensuelles obtenues sont :

Tableau 34 : Valeurs extrêmes de la durée d'insolation (h) moyennes mensuelles.

	Essai						Série Climat. (53-05)
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Moy.
Max	11.5	12.0	9.7	10.9	10.4	10.1	10.2
Min	7.3	5.2	6.6	4.2	5.3	5.1	4.9

I.5.- Les précipitations :

L'importance des précipitations par rapport aux bilans hydriques, nous mène à procéder à une comparaison des précipitations mensuelles ainsi que leurs valeurs cumulées enregistrées durant le cycle de développement de la culture pendant les campagnes expérimentales allant de 2000 à 2005, avec les précipitations mensuelles moyennes et celles avec une probabilité de 70% obtenues à partir d'une analyse fréquentielle réalisée sur une série climatique de 1953 – 2005 (Figure 41).

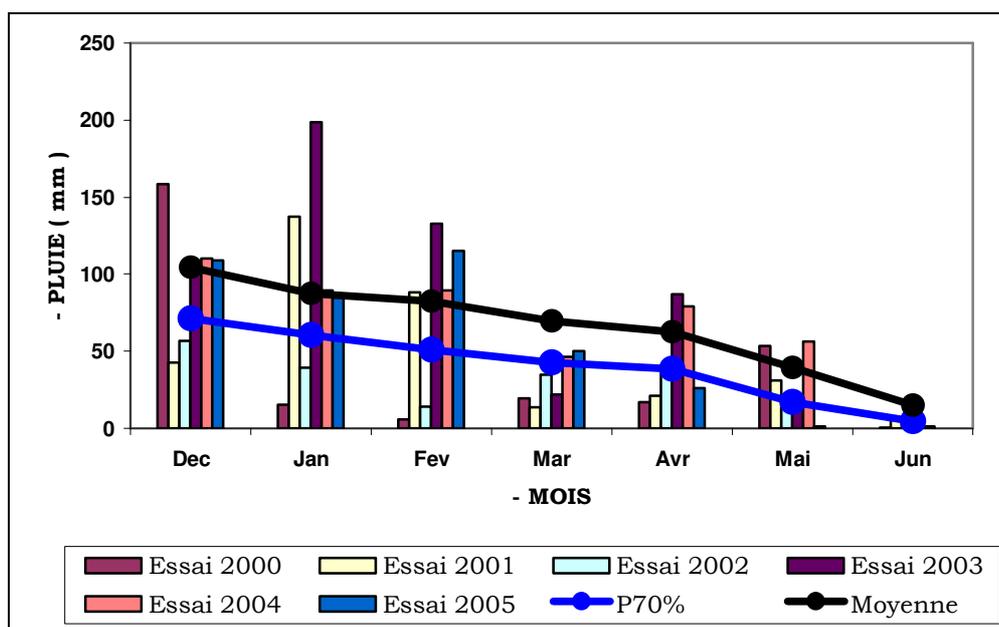


Figure 41 : Précipitations mensuelles des campagnes expérimentales.

Le graphique (Figure 41) semble montrer que les précipitations mensuelles des essais 2003, 2004 et 2005 se rapprochent plus ou moins de celles correspondant à la moyenne mensuelles de la série climatique. Les valeurs des précipitations des essais 2000, 2001 et 2002 sont inférieures aux précipitations moyennes et à celles avec une probabilité de 70%, en notant que les précipitations de l'essai 2002 correspondent plus ou moins à une probabilité de 70%.

Il est à noter, également, qu'il y a une grande variabilité des précipitations pour toutes les campagnes expérimentales avec des amplitudes importantes pour les essais 2001 et 2003.

Les précipitations cumulées du semis jusqu'à la récolte sont représentées sur la graphique ci – dessous :

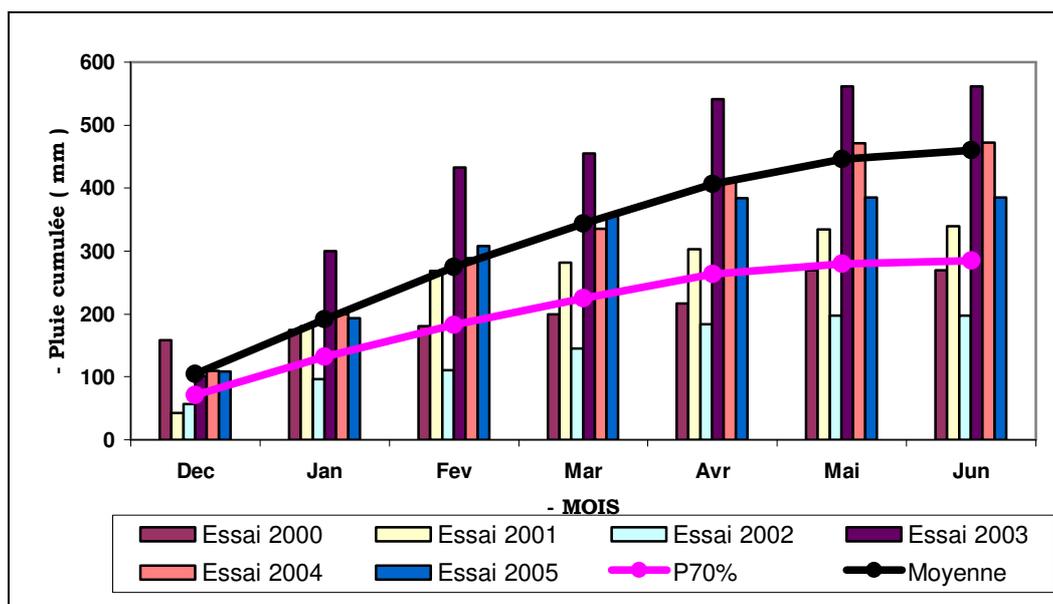


Figure 42 : Précipitations cumulées des campagnes expérimentales

A partir du graphique, nous pouvons constater que les précipitations des campagnes 2004 et 2005 se rapprochent de celles correspondant à la moyenne mensuelle de la série climatique (1953 – 2005). Les valeurs cumulées de l'essai 2000 correspondent plus ou moins à celles relatives à une probabilité de 70% ; tandis que, celles de l'essai 2002 sont nettement plus faibles que les précipitations moyennes et celles à 70%, ce qui nous permet de dire qu'il s'agit bien des deux années qui ont connu un phénomène de sécheresse.

Les précipitations cumulées de la campagne 2001 sont inférieures à la moyenne et se rapprochent plus ou moins des valeurs cumulées relatives à une probabilité de 70%. Nous pouvons noter, également, que les pluies de l'essai 2003 dépassent largement celles relatives à la moyenne de la série climatique.

Les valeurs cumulées totales des précipitations présentées sur le graphique sont résumées dans le Tableau 35 :

Tableau 35 : Valeurs cumulées totales des précipitations (mm).

	ESSAI						Série Climatique	
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Moy.	Prob. 70%
Pluies cumulées totales	270.1	339.9	197.5	561.8	472.0	385.4	460.35	284.5

I.6.- L'évapotranspiration de référence (ETo) :

De même que les précipitations, les « ETo » ont fait l'objet d'une comparaison avec les « ETo » obtenues à partir d'une étude fréquentielles représentée sur la graphique ci – après.

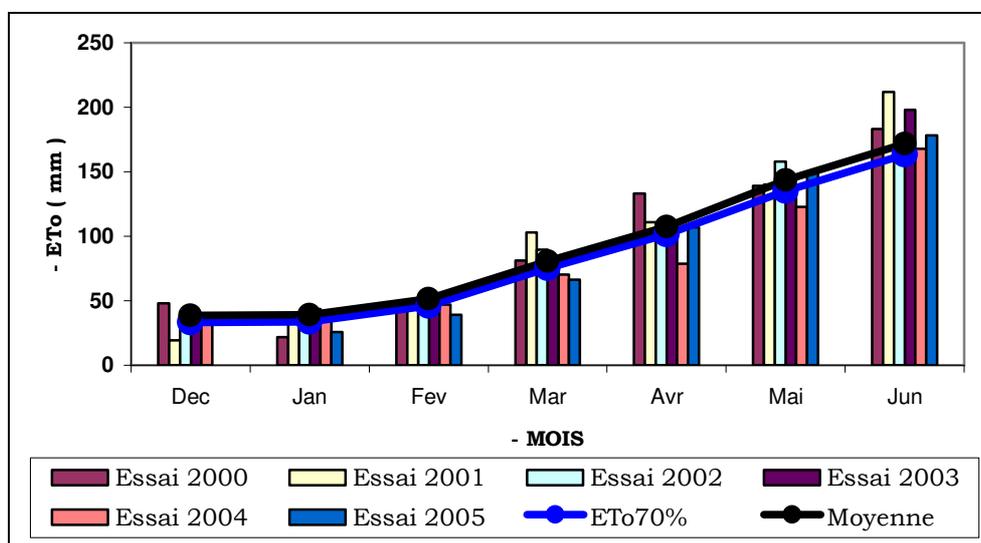


Figure 43 : Evapotranspirations potentielles des campagnes expérimentales.

Le graphique semble montré que les « ETo » mensuelles des campagnes expérimentales se confondent avec les ETo moyennes de la série climatique ainsi qu'avec les ETo relatives à une probabilité de 70%, et ceci durant tout le cycle de la culture, en notant une augmentation à partir du mois de Mars, où la culture est en plein développement, jusqu'à la fin de l'expérimentation.

Les « ETo » cumulées durant tout le cycle de développement de la culture allant de Décembre jusqu'au mois de juin pour toutes les campagnes expérimentales sont présentées dans le graphique ci – dessous :

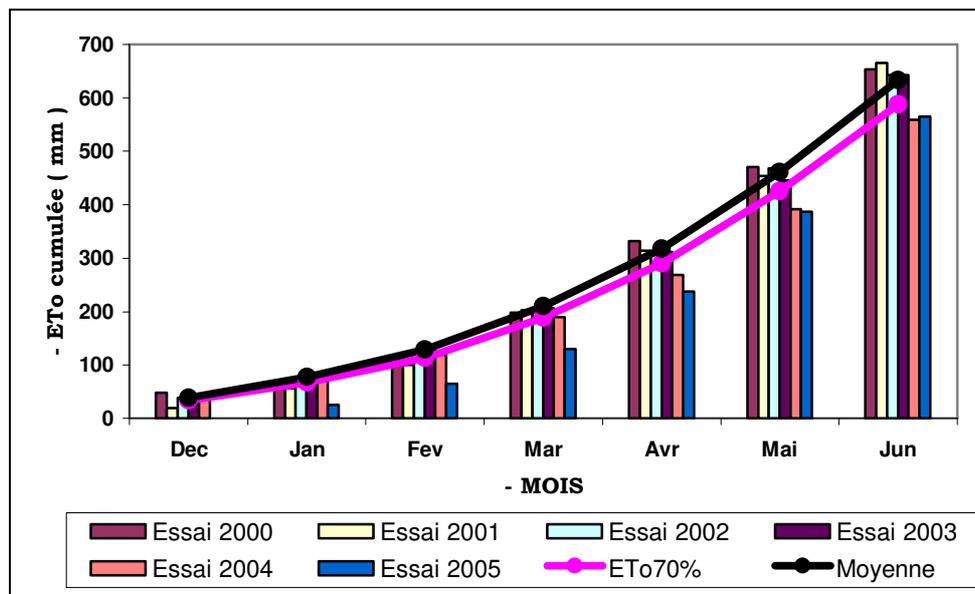


Figure 44 : Evapotranspirations potentielles cumulées des campagnes expérimentales.

Les ETo cumulées des campagnes expérimentales évoluent de la même manière que celles de la série climatique et celles avec une probabilité de 70%. On note cependant des écarts importants entre les ETo des essais 2004, 2005 et celles de la série climatique et celles relatives à une probabilité de 70% avec, cependant des similitudes presque parfaites des valeurs cumulées des ETo de la série climatique avec les essais 2000, 2001, 2002 et 2003.

Les valeurs des ETo cumulées totales obtenues sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 36 : Valeurs cumulées totales des ETo (mm).

	ESSAI						Série Climatique	
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Moy.	Prob. 70%
ETo	653.7	665.8	642.9	643.2	559.3	564.7	632.7	588.0

I.7.- Le déficit climatique :

La même analyse que les précipitations et les ETo a été effectuée sur le déficit pluviométrique que nous présentons sur le graphique suivant

(Figure 45) en comparaison avec la moyenne de la série climatique allant de 1953 à 2005 :

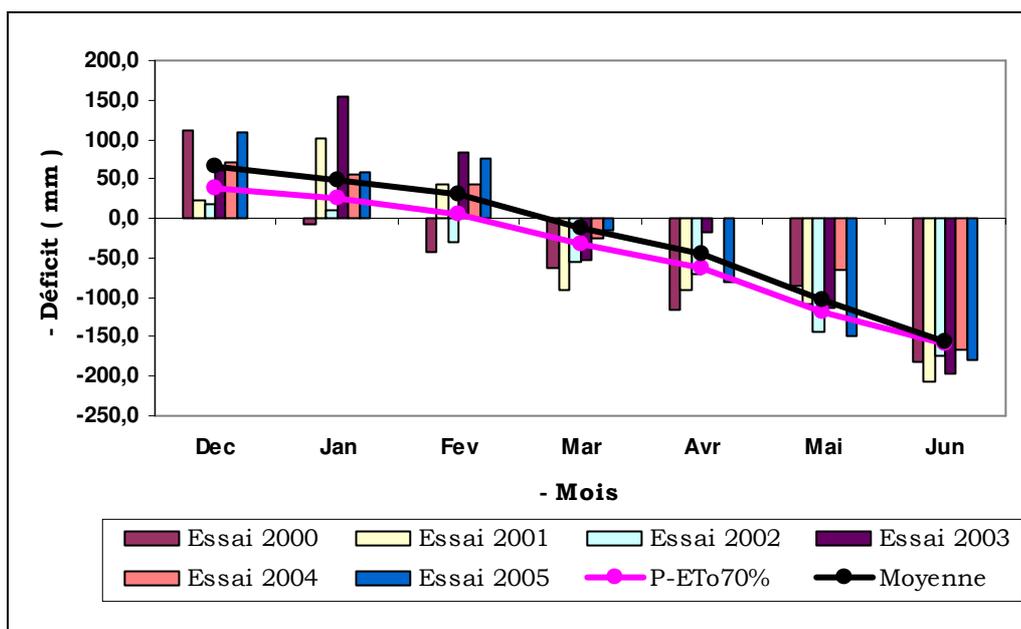


Figure 45 : Déficit pluviométrique des campagnes expérimentales

Le graphique montre l'existence d'un déficit pluviométrique remarquablement important pour toutes les campagnes expérimentales à partir du mois de Mars jusqu'à la fin du cycle de la culture. Ceci est expliqué par le fait qu'il y a une forte demande évaporative de l'atmosphère qui dépasse les précipitations.

Nous pouvons, donc, constater que les essais 2000, 2001 et 2002 ont connu un manque d'eau par rapport au déficit relative à la moyenne de la série climatique et à celui avec une probabilité de 70%.

Le graphique ci – dessous (Figure 46) représente l'évolution des valeurs cumulées du déficit pluviométrique par rapport aux valeurs moyennes de la série climatique et celles relative à une probabilité de 70%.

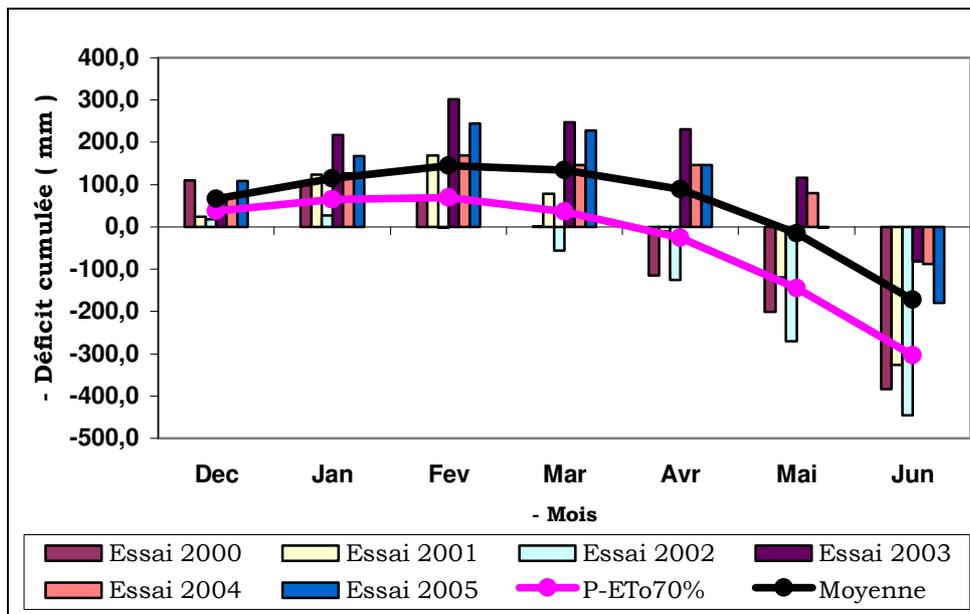


Figure 46 : Déficit pluviométrique cumulé des campagnes expérimentales.

Le graphe montre bien que le déficit pluviométrique des essais 2000, 2001 et 2002 sont plus importants que celui de la moyenne de la série climatique et celui avec une probabilité de 70%. Notons, que la campagne expérimentales 2002 est la plus déficitaire (année sèche).

Remarque :

- Le calcul des évapotranspirations « ETo » a été réalisé à l'aide d'un Logiciel élaboré par Mailhol (Cemagref, Montpellier) utilisant la méthode classique de « PENMAN – MONTEITH » et prenant en considération les valeurs journalières moyennes de la température de l'air, de l'humidité de l'air, de la vitesse du vent et de l'insolation.
- L'analyse fréquentielle des précipitations et ETo a été effectuée à l'aide du Logiciel « RAINBOW » élaboré par l'Université Catholique de Leuven (Belgique) et se basant sur la loi d'ajustement de HAZEN et une distribution normale.

II.- CINETIQUE DE LA RESERVE EN EAU DU SOL :

Nous présenterons dans cette partie une série de graphiques récapitulant les résultats des réserves en eau du sol simulées par Bilhyna et Pilote. Nous y avons inséré celles mesurés pour chaque campagne d'essai dans un but de confrontation avec celles simulées.

De plus, nous avons ajouté les deux réserves " seuils " à capacité en champs et au point de flétrissement ainsi que les apports (pluies et irrigations).

II.1.- Traitements Pluviaux :

Les graphiques n° 47 à 52 montrent respectivement les évolutions des réserves en eau du sol pour les essais de 2000 à 2005.

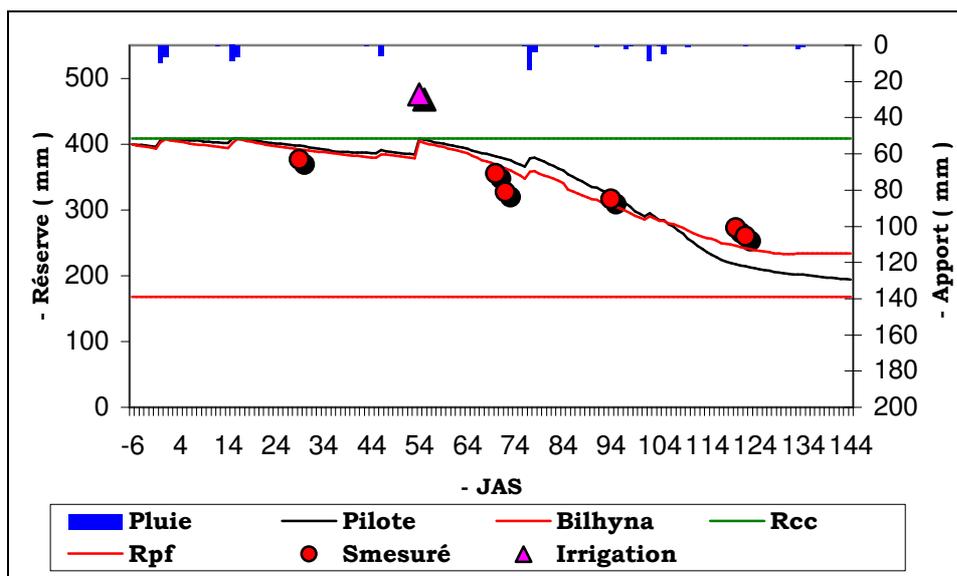


Figure 47 : Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (Traitement PLU, Essai 2000)

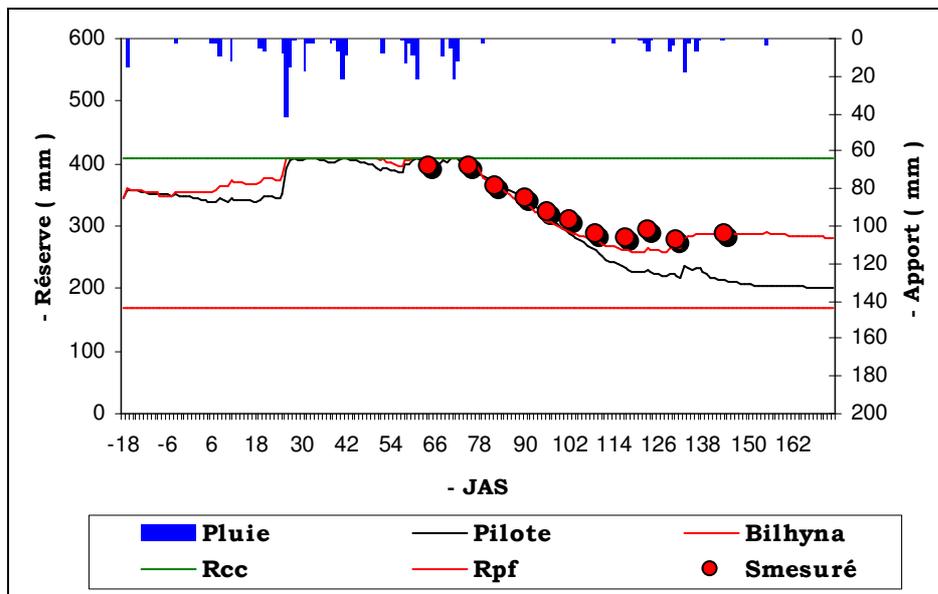


Figure 48 : Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (*Traitement PLU, Essai 2001*)

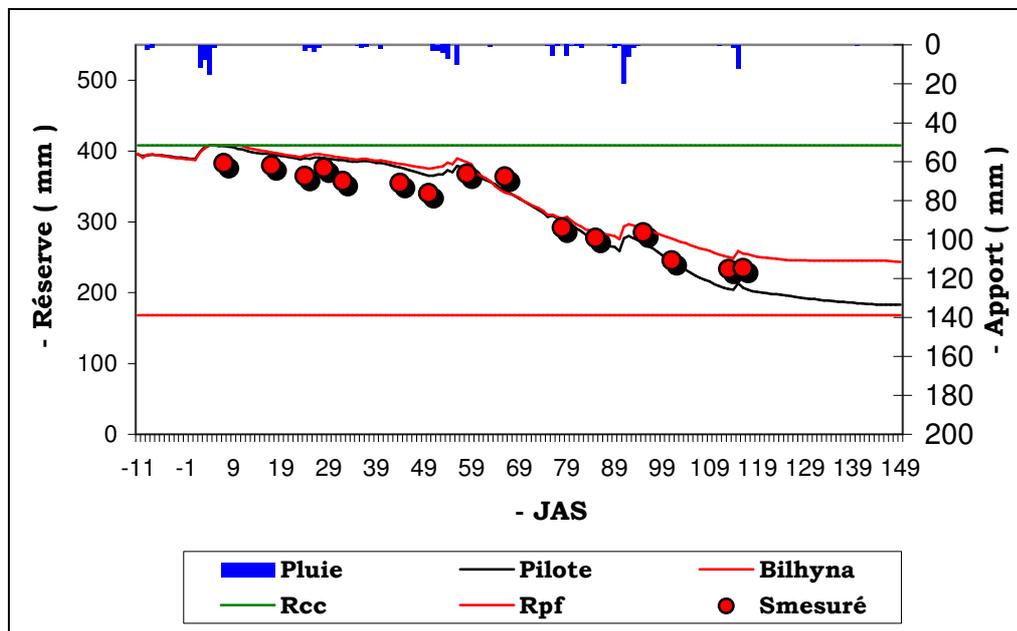


Figure 49 : Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (*Traitement PLU, Essai 2002*)

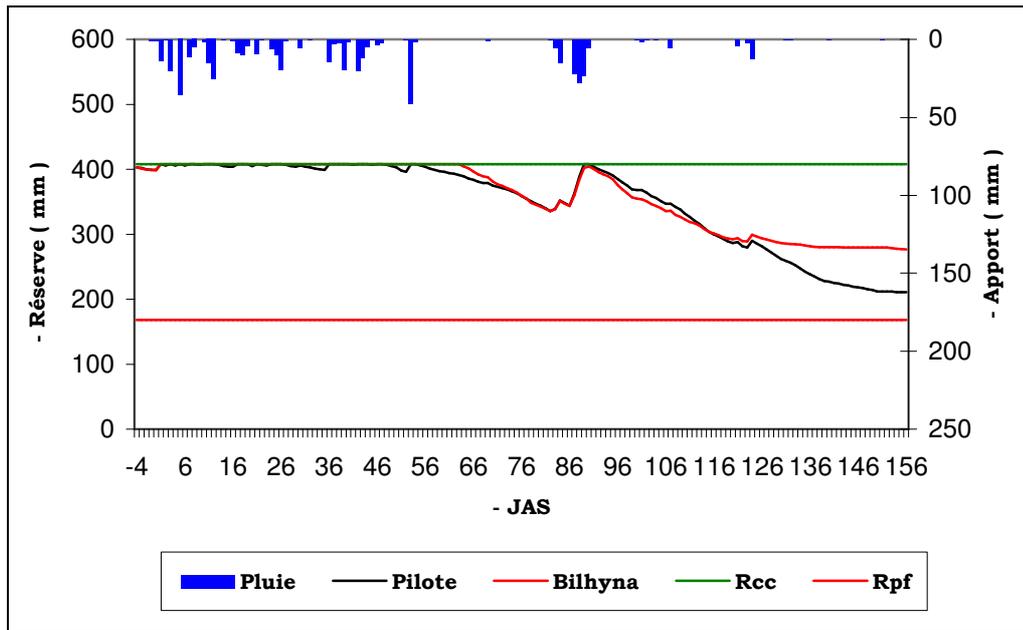


Figure 50 : Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (*Traitement PLU, Essai 2003*)

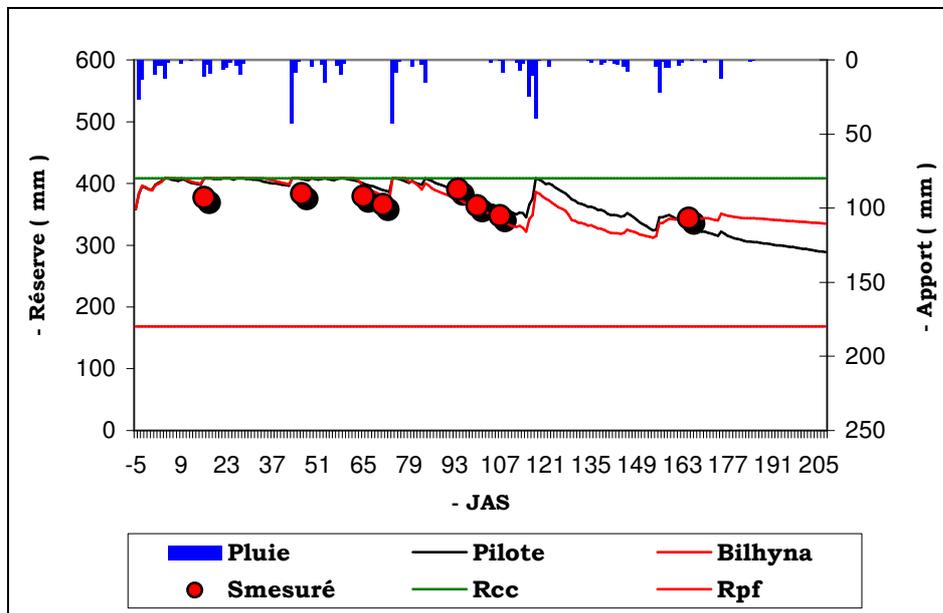


Figure 51 : Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (*Traitement PLU, Essai 2004*)

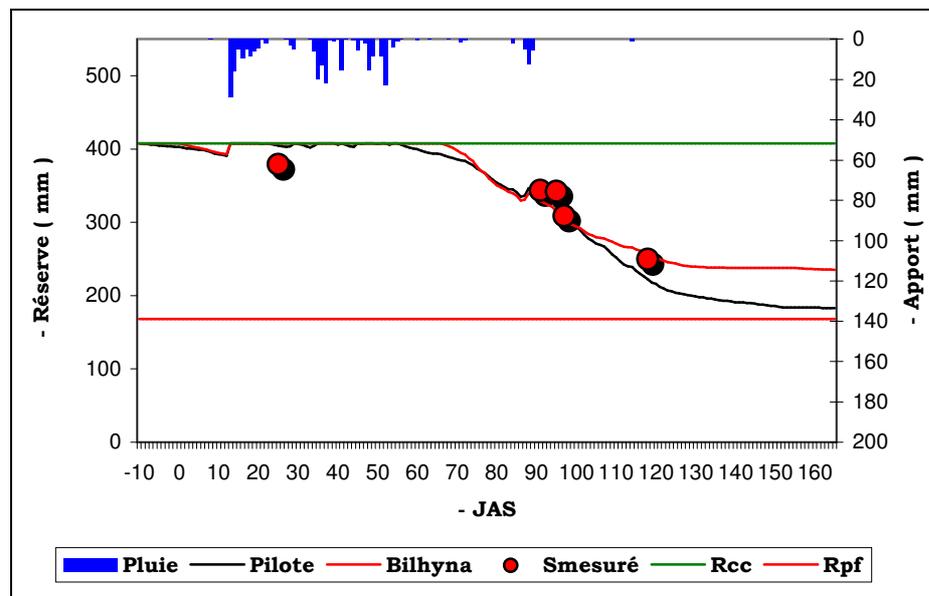


Figure 52 : Evolution des réserves simulées par Pilote et Bilhyna (*Traitement PLU, Essai 2005*)

Au vu des différents graphiques, nous pouvons constater que les réserves évoluent au rythme des pluies et irrigations. Leur évolution présente dans l'ensemble deux phases, l'une allant du semis jusqu'aux environs du 60^{ème} JAS pendant laquelle les réserves restent plus ou moins élevées et avoisinent parfois la capacité au champs, l'autre allant jusqu'en fin de cycle végétatif et qui voit une diminution tantôt progressive tantôt brutale des réserves en eau du sol (ceci étant dû à un effet conjugué entre un épuisement de l'eau du sol par les racines atteignant à ce moment leur croissance maximale et une absence d'apports d'eau). Cette chute de réserves est beaucoup plus accentuée pour les essais 2002 et 2005 pour lesquels les contextes climatiques étaient défavorables, tandis que pour l'essai 2004 les conditions favorables des apports ont permis une évolution moins brutale des réserves qui restent largement au dessus du point de flétrissement jusqu'en fin de cycle. L'on peut aussi noter qu'en fin de cycle et dans tous les cas de figures, la réserve simulée par Pilote a tendance à s'approcher plus vite du seuil critique (point de flétrissement) probablement en raison d'une différence d'approche des fonctions de stress hydrique.

En ce qui concerne les comparaisons entre les deux approches Bilhyna et Pilote, les graphiques semblent montrer une assez bonne concordance entre les réserves simulées plus particulièrement pendant les épisodes pluvieux.

L'insertion des valeurs mesurées des réserves montrent dans l'ensemble un assez " bon " calage avec les réserves simulées par les deux approches, les quelques distorsions provenant certainement du fait que la méthode gravimétrique présente une assez forte variabilité des résultats obtenus.

II.2. Traitements Irrigués :

Les graphiques n° 53 à 55 illustrent respectivement les évolutions des réserves en eau du sol pour les essais 2000 à 2002.

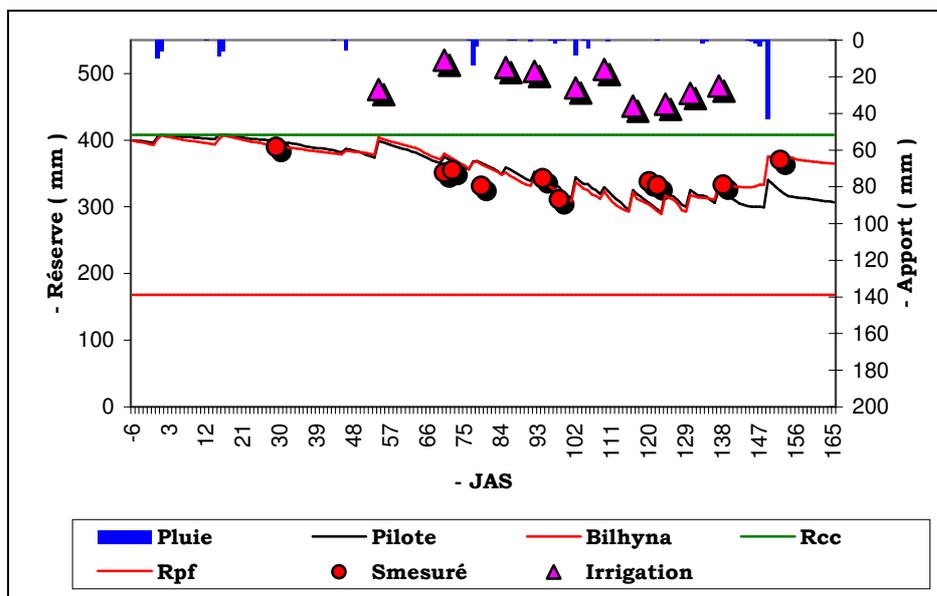


Figure 53 : Evolution de la réserve en du sol Simulée par Pilote et Bilhyna (Traitement ETM, Essai 2000)

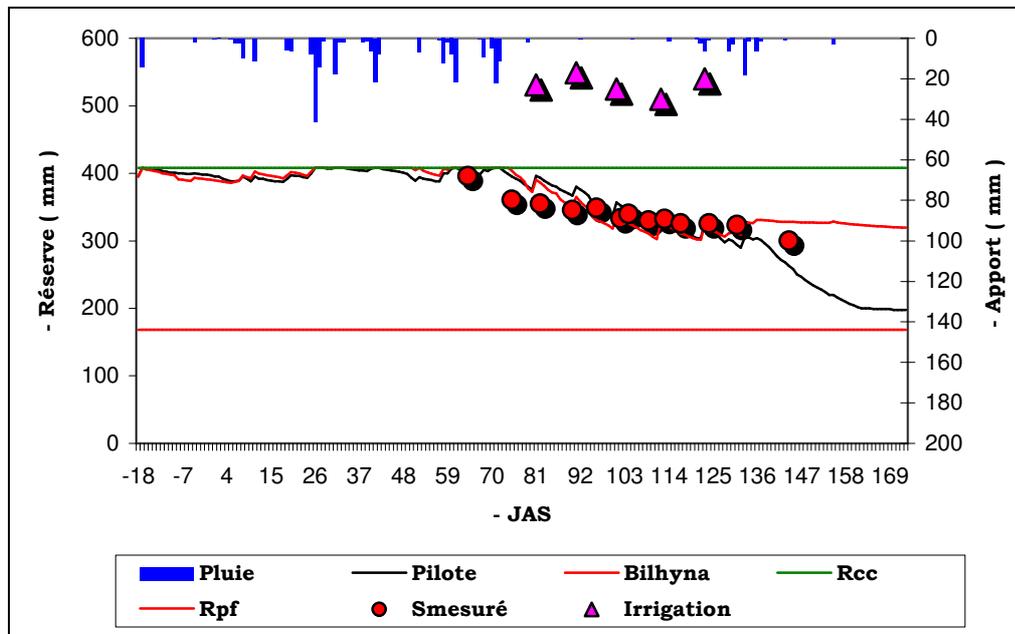


Figure 54 : Evolution de la réserve en du sol simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement ETM, Essai 2001*)

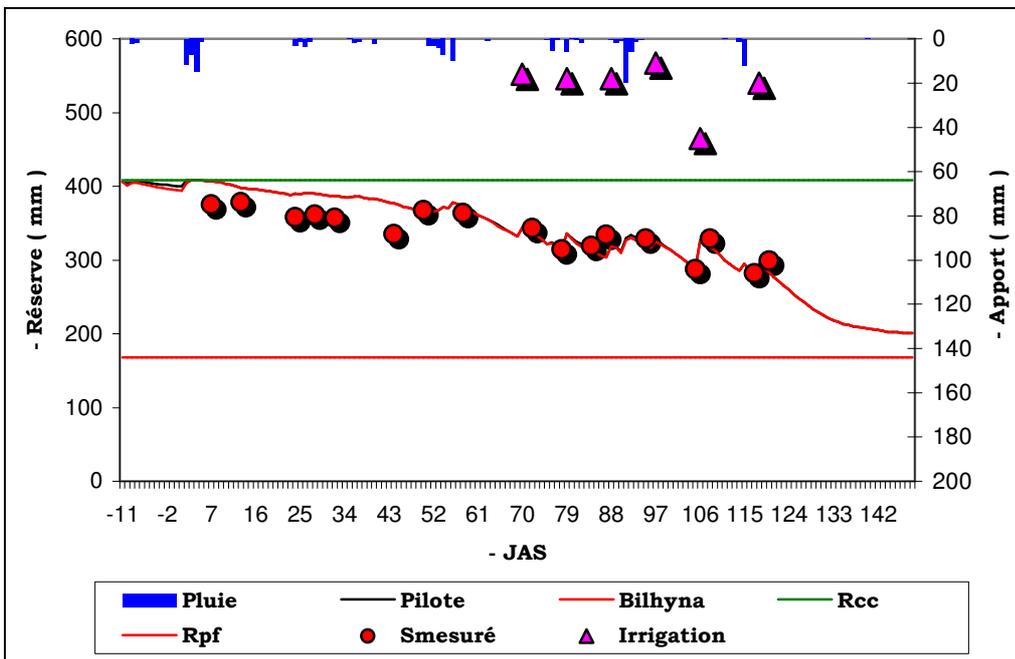


Figure 55 : Evolution de la réserve en du sol simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement ETM, Essai 2002*)

Nous remarquons dans l'ensemble qu'au début du cycle les stocks simulés par Pilote et Bilhyna avoisinent le stock à « CC » jusqu'aux environ du 55^{ème} JAS, puis commence à diminuer progressivement si ce n'est les irrigations apportées durant cette période qui ont fait augmenter, à chaque fois, la réserve. Ces doses d'irrigations apportées ont permis le maintien de la plante en confort hydrique surtout en ce qui concerne l'essai 2000, les autres essais 2001 et 2002 ont vu leurs réserves s'approcher un peu plus du seuil critique en raison d'absence d'apports pluviométriques et d'irrigations insuffisantes.

En ce qui concerne les réserves Bilhyna et Pilote, les mêmes remarques sont valables ici en ce sens qu'elles restent quasi similaires en début de cycle mais qu'elles se séparent en fin de cycle (Les réserves Pilote ayant toujours tendance à se rapprocher plus vite du seuil de flétrissement que celles de Bilhyna).

Les réserves mesurées pour ce traitement semblent aussi s'accorder avec celles des deux modèles plus particulièrement Bilhyna.

II.3.Traitements Modérés :

Les graphiques 56 à 58 représentent respectivement les évolutions des réserves en eau du sol pour les essais 2000 à 2002.

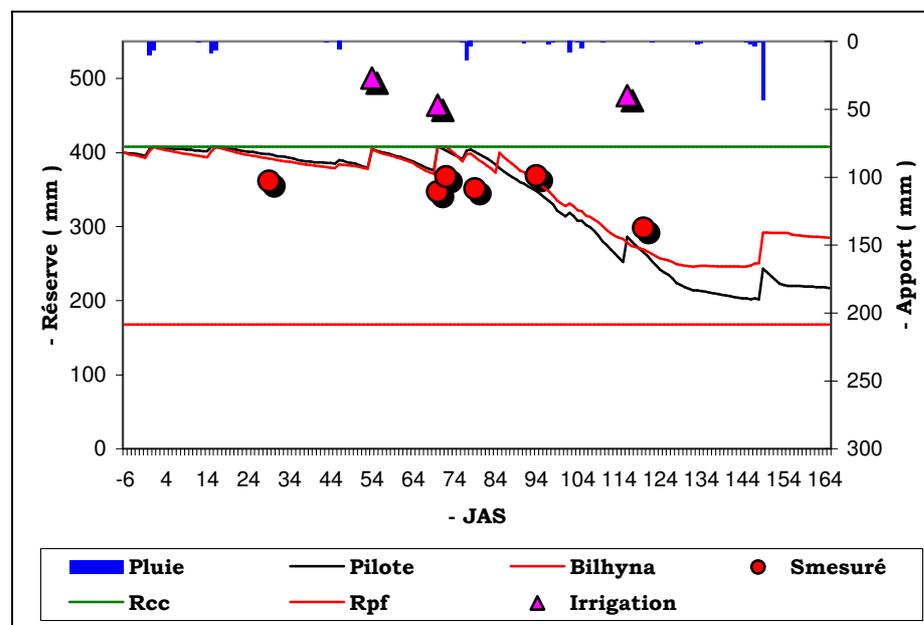


Figure 56 : Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (Traitement MOD, Essai 2000)

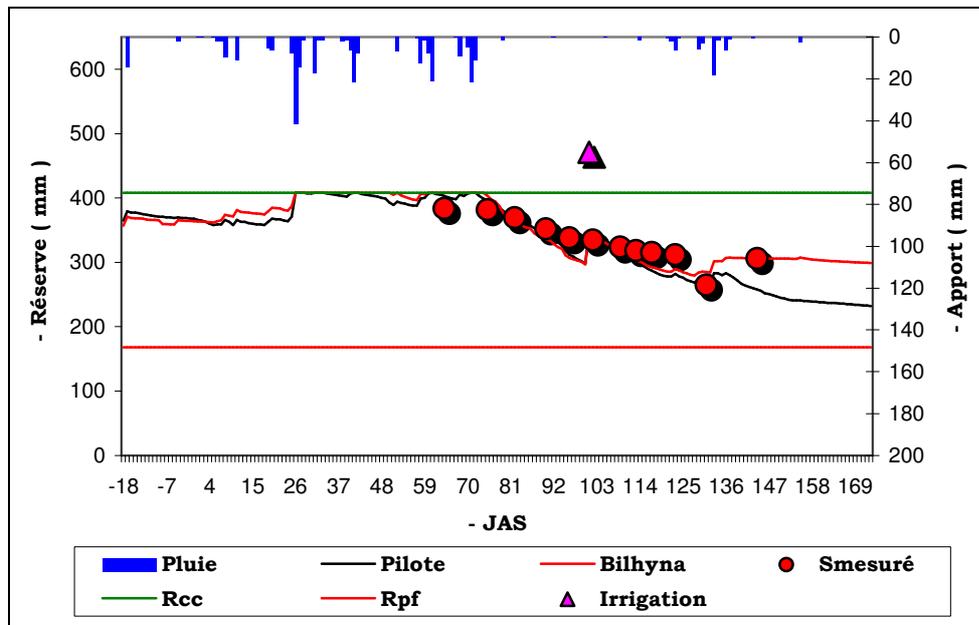


Figure 57 : Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement MOD, Essai 2001*)

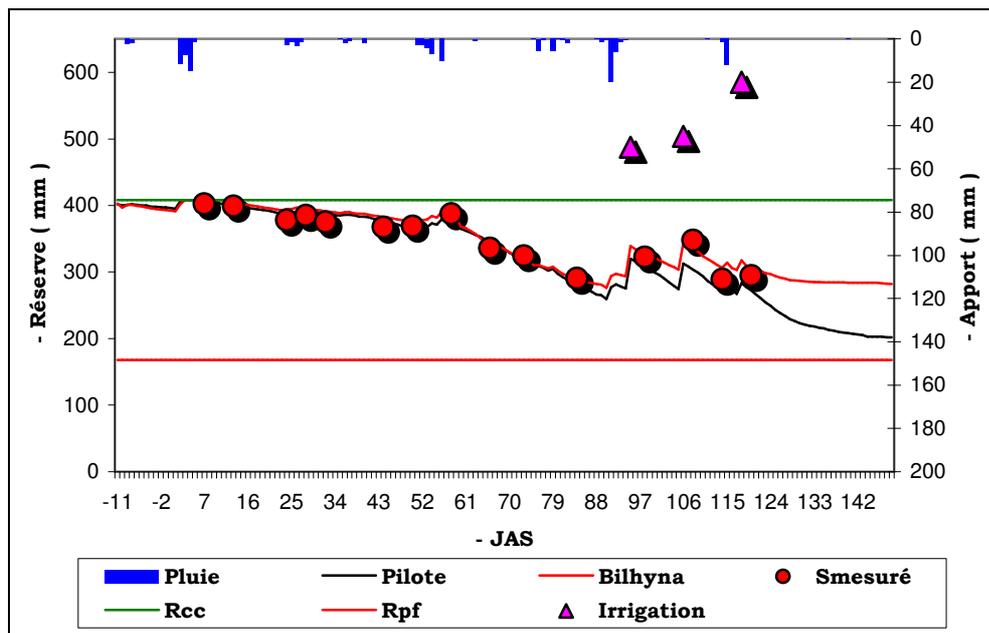


Figure 58 : Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement MOD, Essai 2002*)

En ce qui concerne l'essai 2000, les réserves en eau du sol simulées par les deux modèles Pilote et Bilhyna évoluent pratiquement de la même façon et avoisinent le stock à « CC » du début du cycle jusqu'au 79^{ème} JAS à partir duquel nous notons une diminution importante des

réserves jusqu'à la fin du cycle, et qui s'approchent du stock au « PF » (état de stress hydrique pour la plante à la fin du cycle) . Les doses d'irrigation apportées au début du cycle pour cet essai, ont permis une légère augmentation des réserves en eau du sol (Pilote et Bilhyna) jusqu'à atteindre le seuil maximal (CC) ce qui a permis le maintien de la plante en confort hydrique.

L'évolution des réserves mesurées ne correspond pas à celle des réserves simulées durant toute la période d'essai, en notant des écarts plus ou moins importants.

Pour l'essai 2001, les réserves en eau du sol simulées par les deux modèles se stabilise au voisinage du stock à « CC » du début du cycle jusqu'aux environ du 76^{ème} JAS, à partir duquel nous remarquons une diminution progressive de ces réserves allant jusqu'à la fin du cycle où nous notons des écarts importants entre le stock simulé par Pilote (avoisinant le stock au « PF ») et celui simulé par Bilhyna . La dose d'irrigation survenue durant une période sèche (absence de précipitations) a permis de retarder la diminution des réserves (Pilote et Bilhyna) et l'installation du stress hydrique pour la culture.

La représentation graphique de l'essai 2002 montre que les réserves en eau du sol simulées par Pilote et Bilhyna avoisinent au début du cycle le stock à « CC ». A partir du 58^{ème} JAS nous remarquons une diminution de ces réserves si ce n'est les irrigations apportées à partir du 95^{ème} JAS qui font remonter légèrement les stocks. Nous observons par la suite, que la réserve simulée par Bilhyna se stabilise, tandis que celle simulée par Pilote continue à diminuer en s'approchant du stock au « PF » à la fin du cycle.

II.4.Traitements Sévères :

Les graphiques 59 à 61 montrent respectivement les évolutions des réserves en eau du sol pour les essais 2000 à 2002.

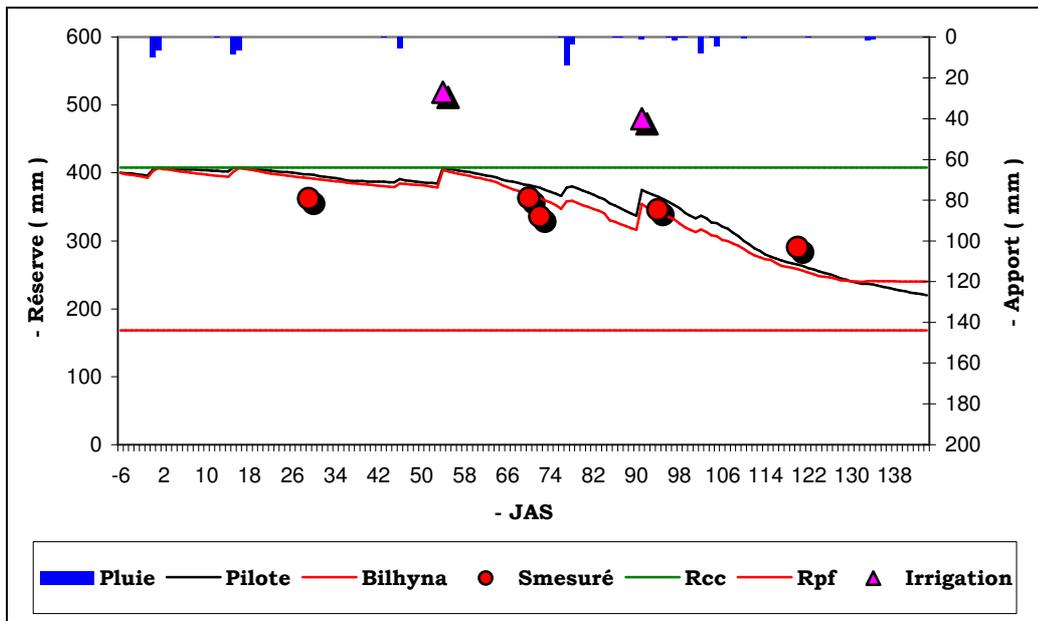


Figure 59 : Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement SEV, Essai 2000*)

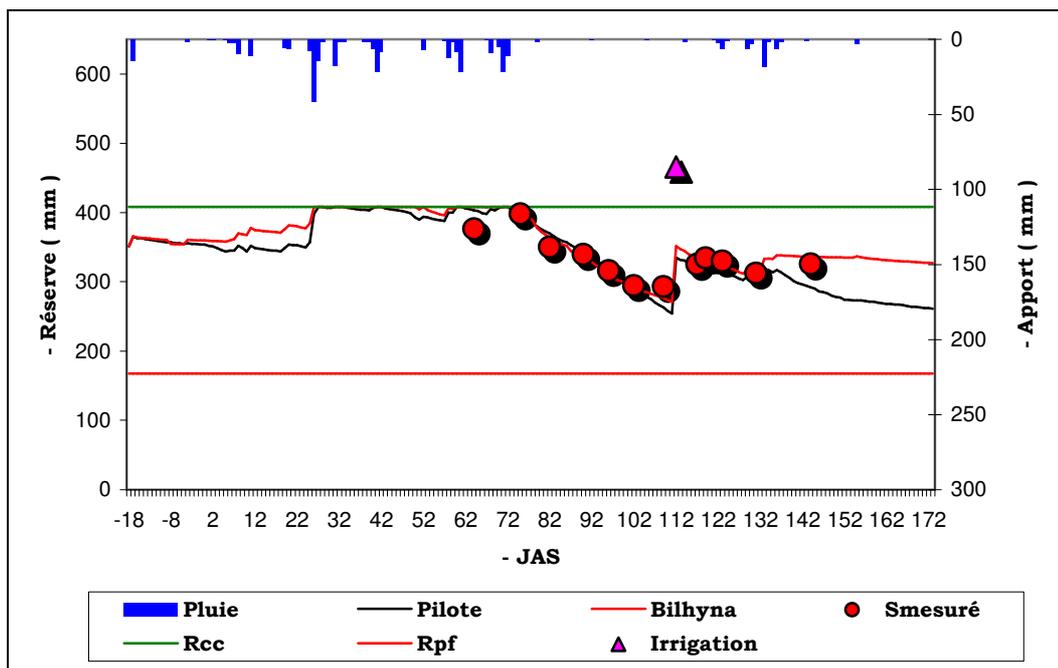


Figure 60 : Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement SEV, Essai 2001*)

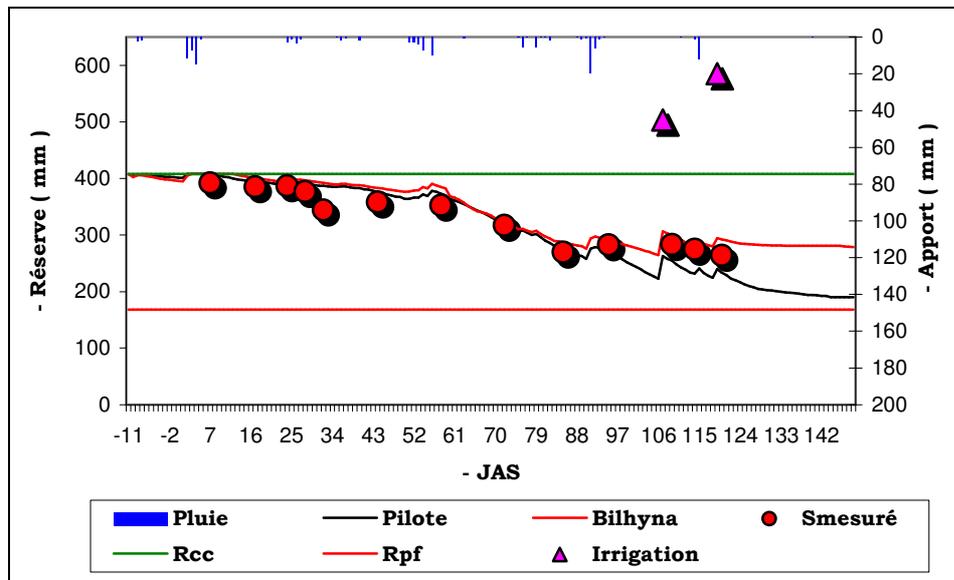


Figure 61 : Evolution de la réserve en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement SEV, Essai 2002*)

Nous remarquons que les réserves de l'essai 2000 (Pilote et Bilhyna) avoisinent le stock à « S_{CC} » du début du cycle jusqu'au 23^{ème} JAS environ, suivi d'une légère diminution des réserves si ce n'est l'irrigation apportée le 54^{ème} JAS (de 27 mm) qui permet de ramener la réserve à « S_{CC} ». A partir du 59^{ème} JAS nous observons une diminution importante des stocks, l'irrigation apportée au 91^{ème} JAS (40 mm) a fait augmenter le stock mais pas suffisamment pour le ramener au stock à « S_{CC} », puis nous remarquons une diminution des réserves jusqu'au voisinage du stock au « PF » provoquant l'installation d'un stress hydrique pour la plante.

L'évolution des réserves mesurées s'approche beaucoup plus de la réserve simulée par Bilhyna.

On remarque à travers le graphique de l'essai 2001 que les réserves en eau du sol simulées par les deux modèles restent d'abord au début du cycle inférieures à celle à « S_{CC} ». Après un épisode pluvieux nous observons une augmentation des réserves jusqu'au stock à « S_{CC} » entre le 28^{ème} JAS et le 75^{ème} JAS. A partir du 76^{ème} JAS environ nous remarquons une forte diminution de la réserve si ce n'est l'irrigation du 112^{ème} JAS qui a fait monter légèrement les réserves mais pas assez pour les ramener au stock à « S_{CC} », cette augmentation est suivie d'une

diminution sans pour autant atteindre le stock au « S_{PF} ». L'installation du stress hydrique est, donc, retardée par l'effet de l'irrigation apportée, ce qui nous permet de conclure que la plante reste en confort hydrique durant pratiquement tout le cycle végétatif.

Les réserves mesurées semblent s'accorder parfaitement avec celles simulées par les deux modèles Pilote et Bilhyna durant toute la période d'essai.

A partir de la représentation graphique de l'essai 2002, nous constatons que les réserves simulées correspondent au stock à « S_{CC} » du début du cycle jusqu'au 19^{ème} JAS environ où nous remarquons une diminution progressive de ces réserves. La dose d'irrigation (45 mm) apportée le 107^{ème} JAS engendre une légère augmentation des réserves mais pas assez pour les ramener au stock à « S_{CC} ». Puis nous observons que ces réserves continuent à diminuer malgré un deuxième apport par irrigation le 119^{ème} JAS (20 mm), cet apport maintient la réserve simulée par Bilhyna à un certain seuil sans atteindre le stock au « S_{PF} », tandis que la réserve simulée par Pilote avoisine le stock au « S_{PF} » à la fin du cycle de la culture.

L'évolution des réserves mesurées se fait pratiquement de la même manière que celles des réserves simulées par les deux modèles avec des écarts peu importants, ce qui permet de conclure que les deux modèles Pilote et Bilhyna reconstituent plus ou moins valablement les données expérimentales.

Afin de justifier nos interprétations, nous avons réunis les résultats des réserves en eau du sol pour tous les traitements et établi deux types de régressions linéaires :

- L'une permettant de tester la confrontation entre les valeurs des réserves simulées par Bilhyna et Pilote (Figure 62)
- L'autre permettant une confrontation des réserves simulées et mesurées pour les deux modèles (Figure 63)

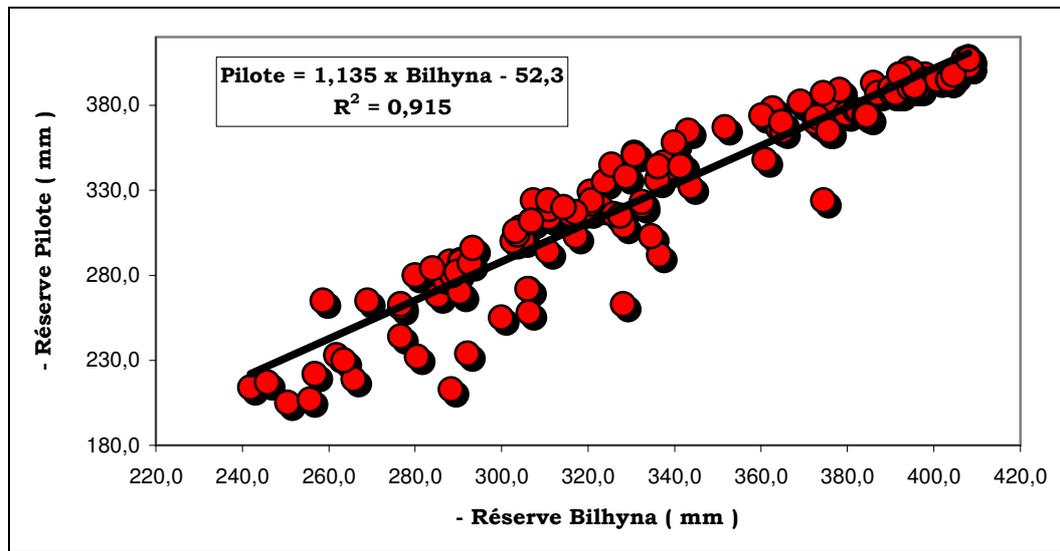


Figure 62 : Relation entre les réserves en eau du sol simulées par Pilote et Bilhyna

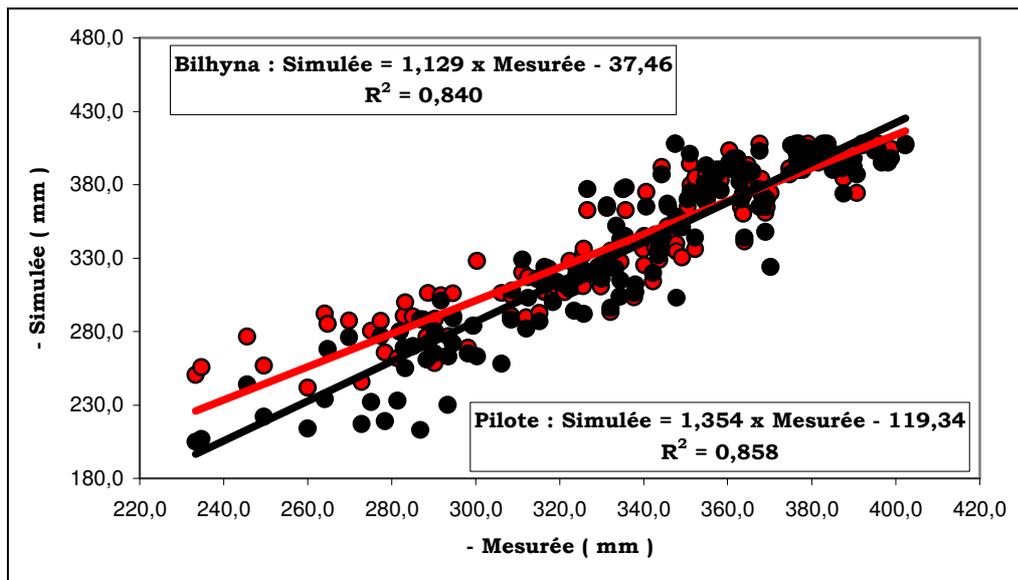


Figure 63 : Relation entre réserves en eau du sol mesurées et simulées par Bilhyna et Pilote

Le graphique ci – dessus montre que les deux approches donnent lieu à des réserves fortement corrélées avec un coefficient de détermination satisfaisant $R^2 = 0.915$. L'équation issue traduisant cette relation s'écrit :

$$R_{Pilote} = 1.135 \times R_{Bilhyna} - 52.3$$

..... (72)

L'analyse de la variance de la régression obtenue vient ainsi confirmer que le modèle obtenu est acceptable eu égard aux des probabilités insignifiantes de (0.0000) pour l'ordonnée, la pente et le modèle traduisant une relation jugée « *très hautement significative* » (Annexe10).

En ce qui concerne les relations entre les réserves en eau du sol mesurées et simulées par les deux modèles, le graphique montre un assez bon " calage " avec des coefficients de détermination pratiquement identiques « $R^2 = 0.840$ et $R^2 = 0.858$ » respectivement pour Bilhyna et Pilote. Ceci confirme les analyses faites pour les graphiques d'évolution des réserves en ce sens que les deux approches donnent lieu à des simulations assez proches. Les équations respectives obtenues pour les deux modèles sont :

$$\text{BILHYNA : } R_{\text{Simulée}} = 1.129 \times R_{\text{Mesurée}} - 37.46 \quad \dots\dots\dots (73)$$

$$\text{PILOTE : } R_{\text{Simulée}} = 1.354 \times R_{\text{Mesurée}} - 119.34 \quad \dots\dots\dots (74)$$

L'analyse de la variance de ces régressions montre encore une fois que les probabilités confirmant qu'il s'agit bien de relations jugées « *très hautement significatives*» (Annexe10).

En conclusion, nous réitérons ici les remarques les plus importantes concernant l'analyse des réserves en eau du sol :

- *Les simulations par les deux modèles semblent être assez concordante dans l'ensemble malgré que les réserves Pilote diminuent fortement en fin de cycle végétatif en raison probablement d'une différence liée à des fonctions de stress Bilhyna et Pilote différentes.*
- *Les confrontations entre les deux modèles et les valeurs des réserves mesurées ont donné lieu à des résultats largement satisfaisants.*

III.- EVOLUTION DE L'INDICE DE SURFACE FOLIAIRE « LAI » :

L'indice de surface foliaire " LAI " constitue l'un des paramètres intimement liés à la croissance végétale. Dans ce chapitre, nous tenterons d'analyser cet indice par le biais des valeurs simulées par les deux modèles et une confrontation avec celles mesurées *in situ* (partie Matériels et Méthodes).

III.1.Traitements Pluviaux :

Les graphiques 64 à 69 montrent respectivement les évolutions de l'indice de surface foliaire « LAI » pour les essais 2000 à 2005.

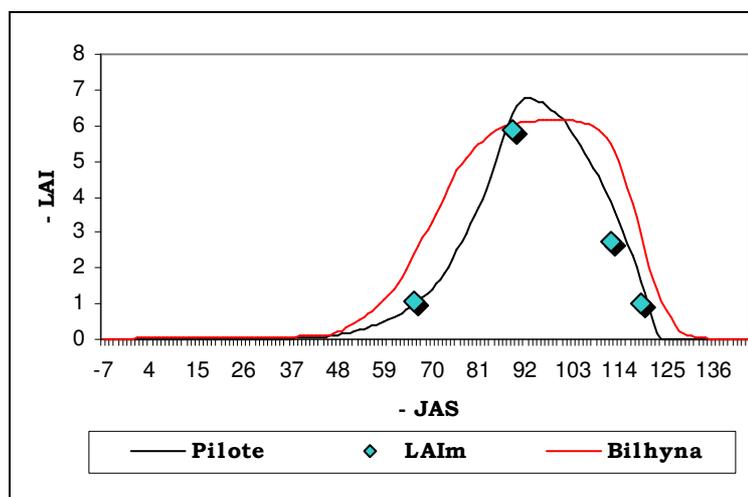


Figure 64 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement PLU, Essai 2000)

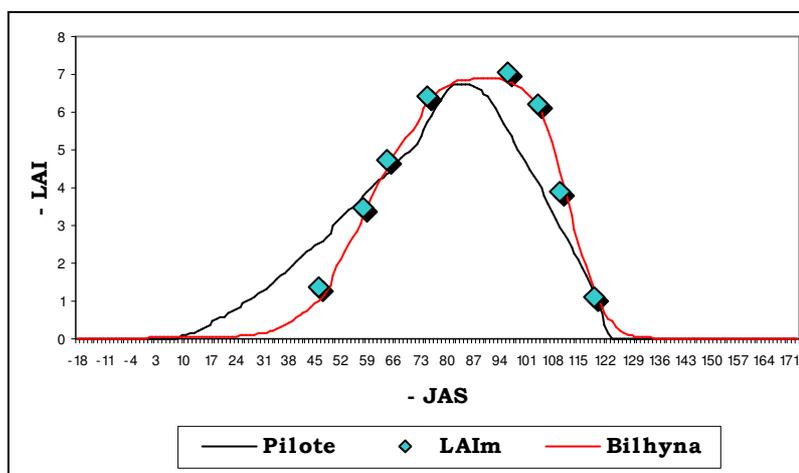


Figure 65 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement PLU, Essai 2001)

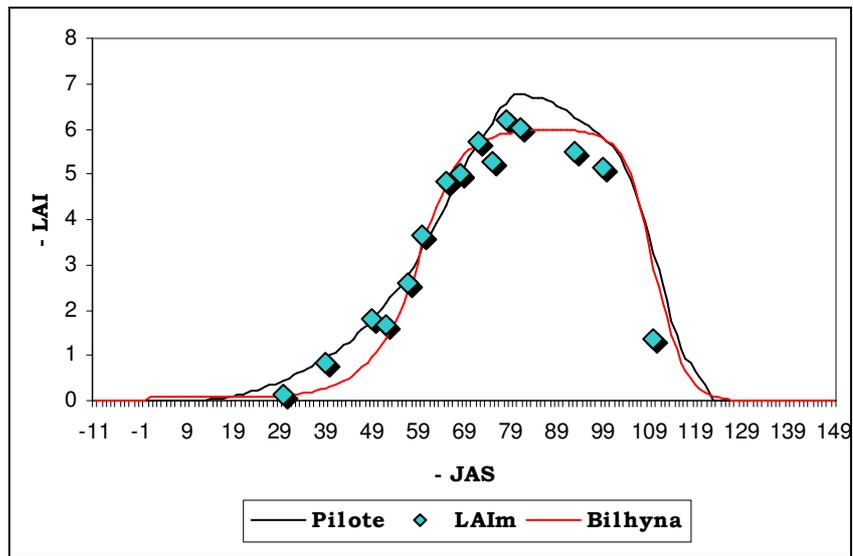


Figure 66 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement PLU, Essai 2002)

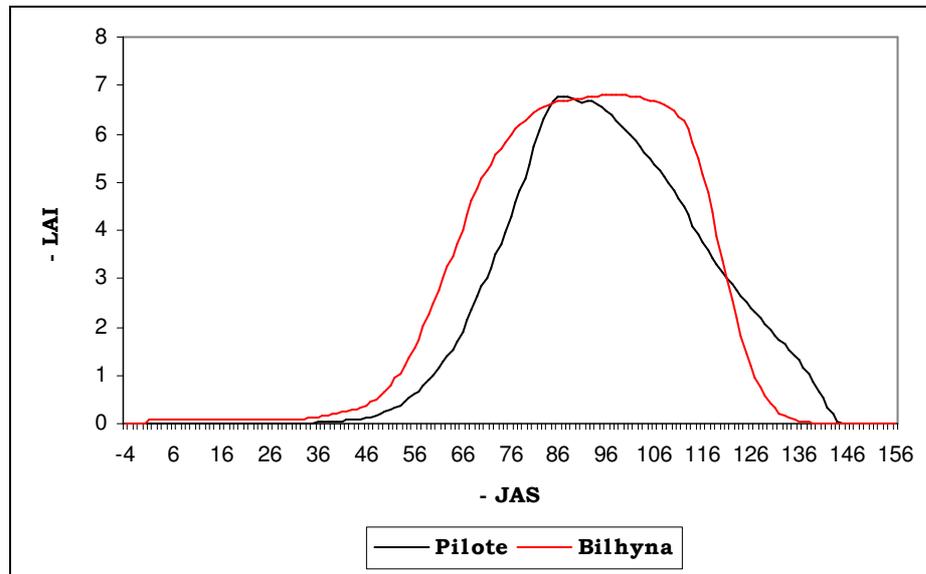


Figure 67 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement PLU, Essai 2003)

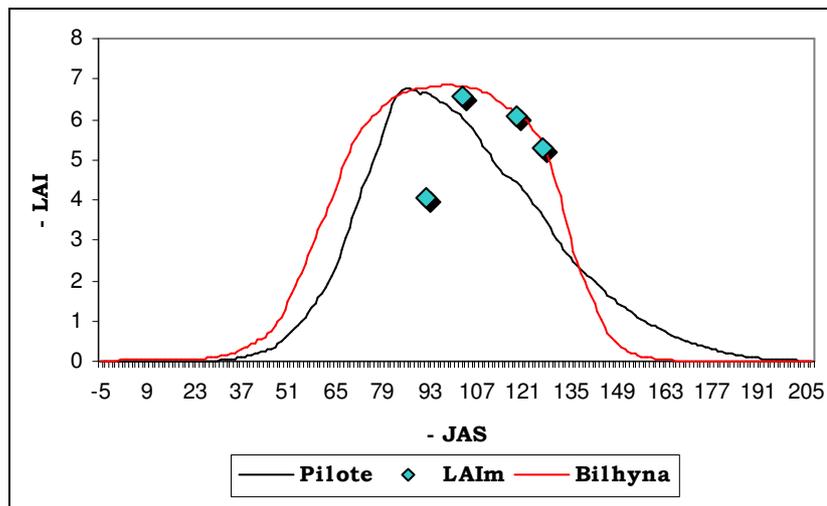


Figure 68 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement PLU, Essai 2004)

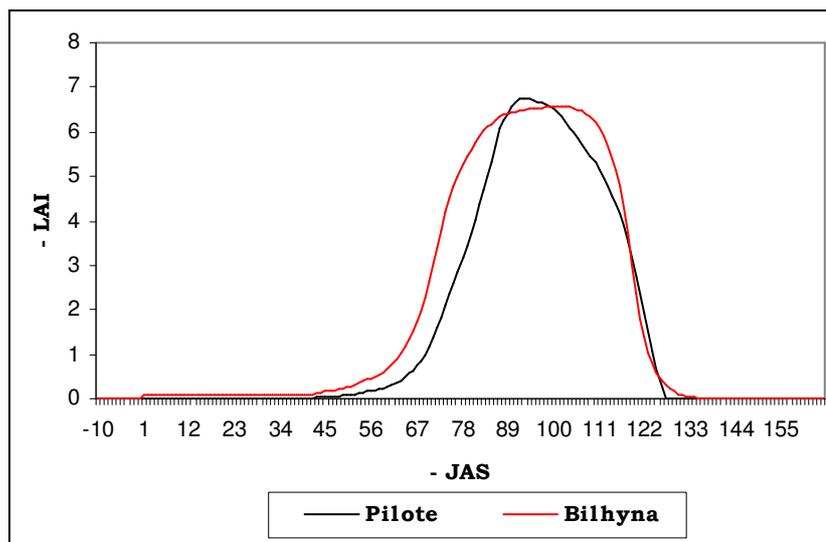


Figure 69 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement PLU, Essai 2005)

Les graphiques des « LAI » pour les traitements pluviaux montrent qu'il existe des différences notables entre les LAI simulés par Bilhyna et Pilote. Cependant, il faut noter que les « LAI_{max} » obtenus par les deux approches semblent avoir lieu pratiquement aux mêmes périodes. Ainsi, les valeurs des « LAI_{max} » et leurs dates respectives ont été de :

- Essai 2000 :

* 6.76 le 92^{ème} JAS (Pilote)

- * 6.15 le 99^{ème} JAS (Bilhyna)
- Essai 2001 :
 - * 6.76 le 83^{ème} JAS (Pilote)
 - * 6.92 le 91^{ème} JAS (Bilhyna)
- Essai 2002 :
 - * 6.76 le 81^{ème} JAS (Pilote)
 - * 5.99 le 89^{ème} JAS (Bilhyna)
- Essai 2003 :
 - * 6.76 la 87^{ème} JAS (Pilote)
 - * 6.81 le 97^{ème} JAS (Bilhyna)
- Essai 2004 :
 - * 6.76 le 87^{ème} JAS (Pilote)
 - * 6.85 le 99^{ème} JAS (Bilhyna)
- Essai 2005 :
 - * 6.77 le 93^{ème} JAS (Pilote)
 - * 6.56 le 101^{ème} JAS (Bilhyna)

Il faut aussi noter que les « LAI_{max} » simulés par Bilhyna et Pilote reflètent assez bien la valeur du « LAI_{max} » de 7.0 prise comme donnée d'entrée des modèles.

Toutefois, les courbes de croissance et décroissance des deux modèles présentent néanmoins des différences importantes dues justement aux modèles de croissance différents entre Bilhyna et Pilote (partie bibliographique).

En ce qui concerne les « LAI » mesurés, ils se rapprochent beaucoup plus des « LAI » simulés par Bilhyna dans la plupart des cas.

III.2.Traitements Irrigués :

Les graphiques 70 à 72 illustrent respectivement les évolutions de l'indice de surface foliaire « LAI » pour les essais 2000 à 2002.

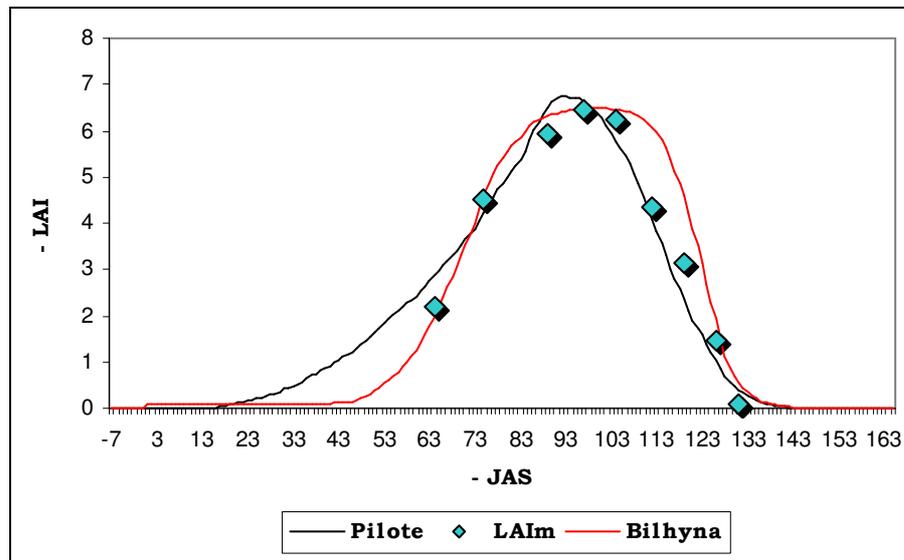


Figure 70 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement ETM, Essai 2000)

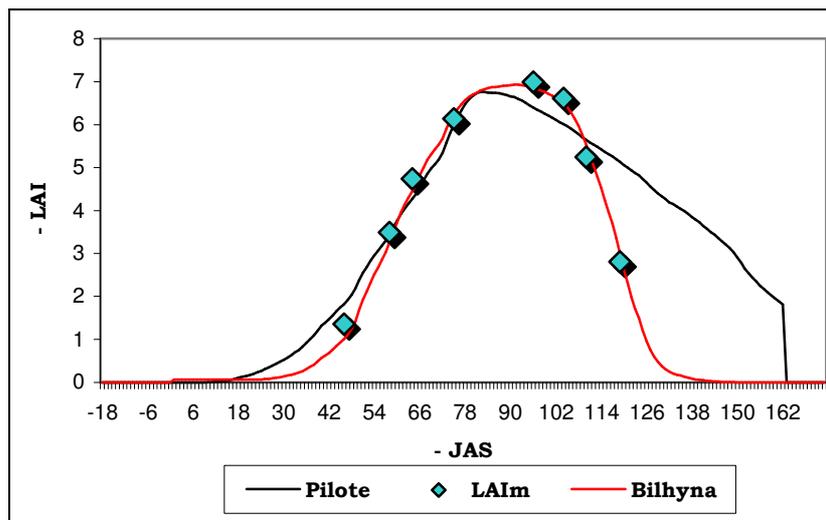


Figure 71 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement ETM, Essai 2001)

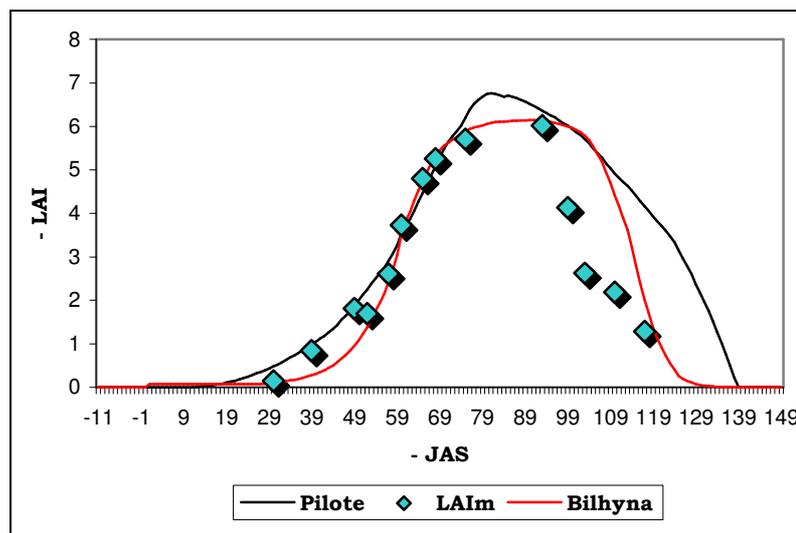


Figure 72 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement ETM, Essai 2002)

Les mêmes remarques que celles observées pour les traitements pluviaux sont valables ici pour les traitements ETM. Il faut cependant noter que le "calage" entre valeurs des « LAI » simulées et mesurées est beaucoup plus significatif pour le traitement ETM.

Les valeurs des « LAI_{max} » obtenus varient entre 6.76 pour Pilote et 6.93 pour Bilhyna, valeurs très proches du « LAI_{max} » initial de 7.0.

III.3. Traitements Modérés :

Les graphiques n° 73 à 75 montrent respectivement les évolutions de l'indice de surface foliaire « LAI » pour les essais 2000 à 2002.

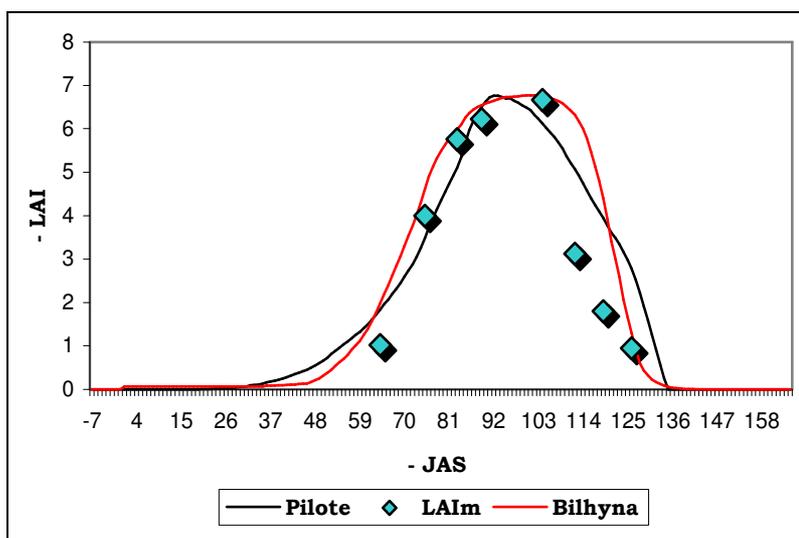


Figure 73 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement MOD, Essai 2000)

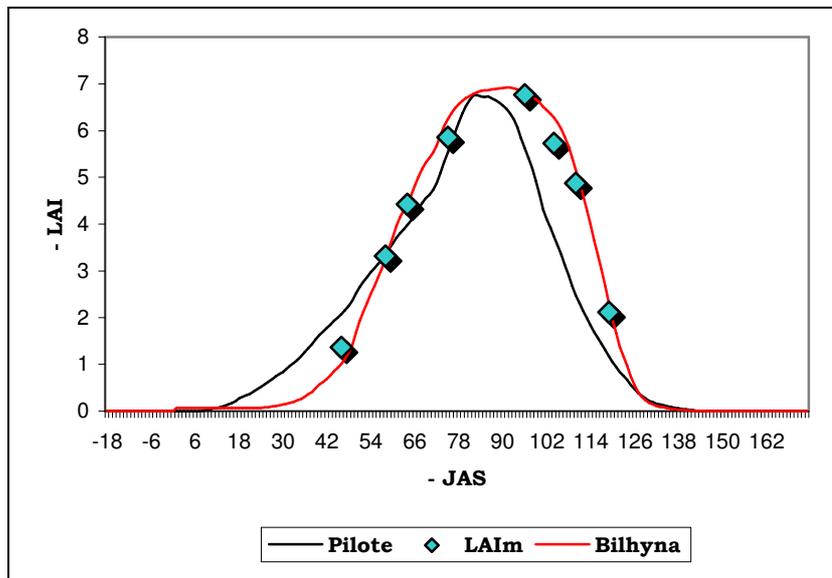


Figure 74 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement MOD, Essai 2001)

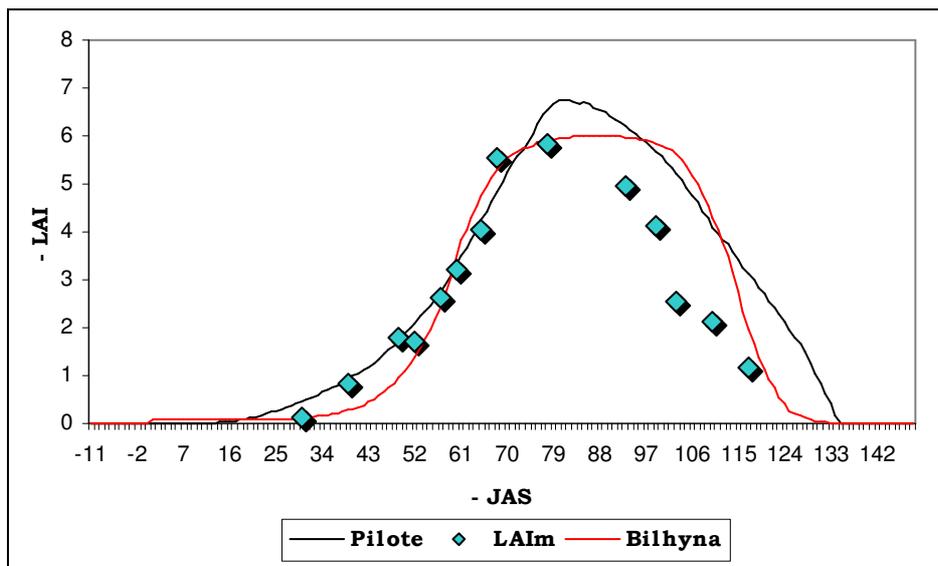


Figure 75 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement MOD, Essai 2002)

En ce qui concerne l'essai 2000, nous pouvons constater que les « LAI » simulés par les deux modèles suivent pratiquement la même évolution avec cependant des écarts plus ou moins importants en phase de croissance et de décroissance . Les valeurs maximales des « LAI » estimées sont de 6.76 le 92^{ème} JAS et 6.77 le 100^{ème} JAS respectivement pour Pilote et Bilhyna.

Nous remarquons que les valeurs observées des « LAI » s'accordent plus ou moins bien avec ceux simulés par Pilote et Bilhyna, en notant des écarts plus ou moins importants en fin de cycle.

Le graphique concernant l'essai 2001 semble montrer que l'évolution des « LAI » simulés par Pilote et Bilhyna se fait presque de la même façon avec des écarts plus ou moins importants durant tout le cycle de la culture. Les valeurs maximales atteintes sont de 6.76 le 83^{ème} JAS et 6.92 le 91^{ème} JAS respectivement pour Pilote et Bilhyna.

Les « LAI » mesurés s'accordent, dans l'ensemble, parfaitement avec les « LAI » simulés par le modèle Bilhyna durant toute la période d'essai, tandis que des écarts importants sont à noter entre les valeurs du « LAI » simulés par Pilote et ceux mesurés sur terrain.

Les LAI simulés par les deux modèles pour l'essai 2002 nous permettent de noter que l'évolution des « LAI » simulés est similaire, avec cependant une surestimation des valeurs par Pilote. Les valeurs maximales des « LAI » sont de l'ordre de 6.76 (présence d'un léger stress hydrique) le 81^{ème} JAS pour Pilote et 6.0 le 87^{ème} JAS pour Bilhyna (présence d'un stress hydrique plus ou moins important).

Les « LAI » observés correspondent plus ou moins aux « LAI » simulés par les deux modèles au début du cycle, puis nous remarquons des écarts importants à partir du 80^{ème} JAS environ jusqu'à la fin du cycle de la culture.

III.4.Traitements Sévères :

Les graphiques n° 76 à 78 montrent respectivement les évolutions de l'indice de surface foliaire « LAI » pour les essais 2000 à 2002.

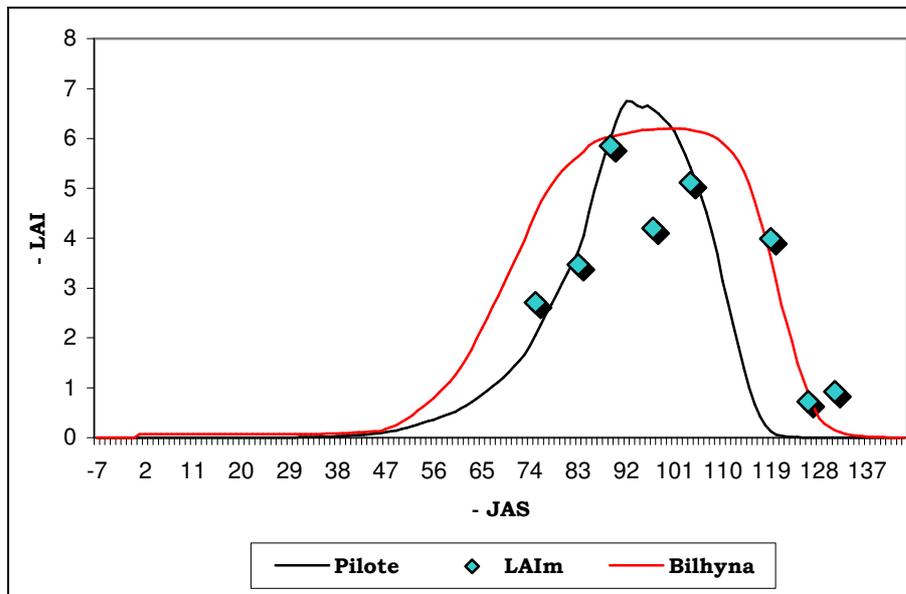


Figure 76 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(*Traitement SEV, Essai 2000*)

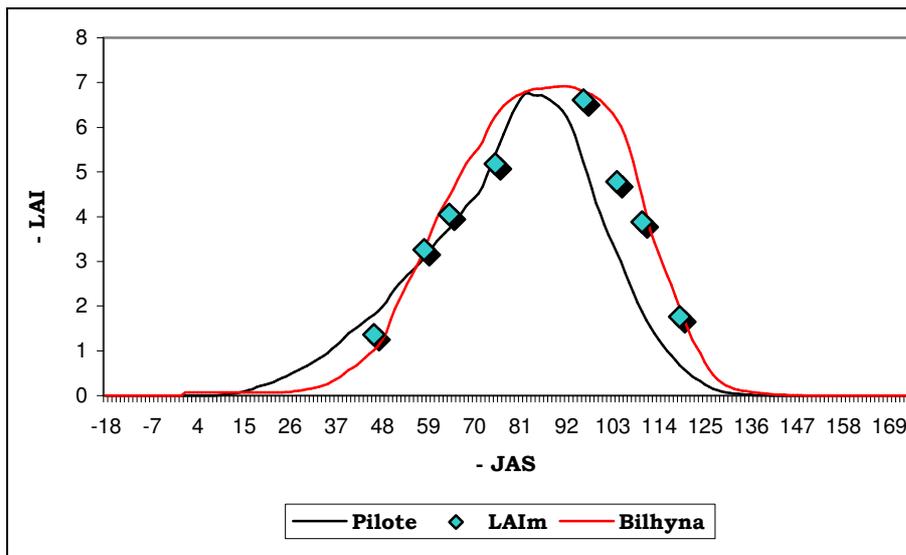


Figure 77 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(*Traitement SEV, Essai 2001*)

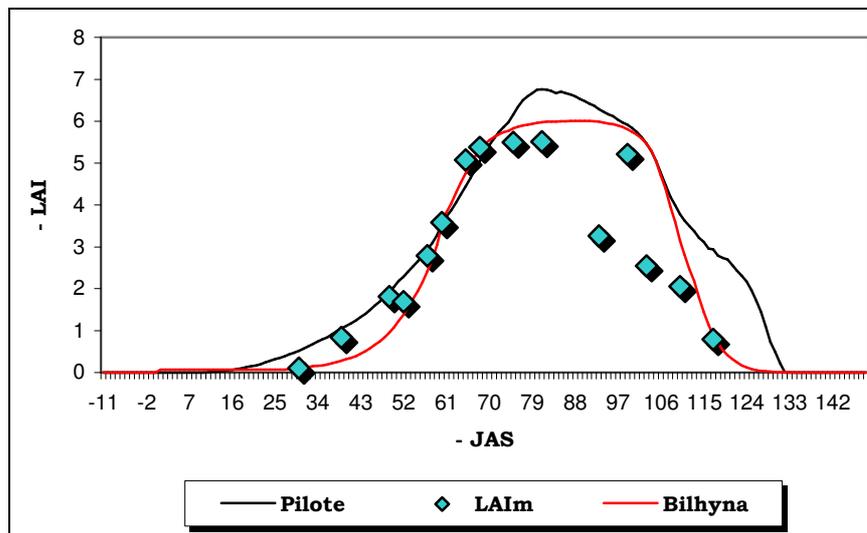


Figure 78 : Evolution du LAI simulé par Pilote et Bilhyna
(Traitement SEV, Essai 2002)

L'évolution des « LAI » simulés pour l'essai 2000 par les deux modèles se présente différemment avec des écarts importants durant toute la période d'essai. Cependant, les « LAI_{max} » estimés pratiquement aux mêmes périodes par Pilote et Bilhyna sont respectivement de l'ordre de 6.75 le 92^{ème} JAS et 6.2 le 100^{ème} JAS.

Les « LAI » observés concordent dans l'ensemble avec ceux simulés par Pilote, en notant des écarts plus ou moins important en fin du cycle.

Les « LAI » de l'essai 2001 montrent que les valeurs simulées par Pilote dépassent celles simulés par Bilhyna jusqu'au 57^{ème} JAS environ, puis nous observons une sous estimation des « LAI » Pilote jusqu'à la fin du cycle de la culture. Les valeurs maximales du « LAI » simulé sont de 6.76 le 83^{ème} JAS pour Pilote et 6.92 le 91^{ème} JAS pour Bilhyna.

L'évolution des « LAI » simulés par Bilhyna correspond pratiquement à celle des « LAI » mesurés *in situ* avec des écarts peu importants.

A partir du graphique correspondant à l'essai 2002, nous pouvons constater qu'il y a une sur – estimation des « LAI » simulés par Pilote en comparaison avec ceux simulés par Bilhyna durant pratiquement tout le cycle végétatif. Les « LAI_{max} » atteignent des valeurs de 6.76 le 81^{ème} JAS et 6.01 le 87^{ème} JAS respectivement pour Pilote et Bilhyna.

Les « LAI » expérimentaux évoluent presque de la même façon que ceux simulés par Bilhyna avec des écarts plus ou moins importants durant toute la période d'essai.

Nous avons ensuite réunis toutes les valeurs des « LAI » pour clôturer cette analyse par la réalisation de deux régressions de type linéaire suivantes :

- Une première régression entre les « LAI » simulés par Pilote et ceux simulés par Bilhyna.
- Une deuxième régression entre les « LAI » simulés par les deux modèles et ceux mesurés sur le terrain.

Les graphiques obtenus (Figure 79 et 80) montrent respectivement la relation entre les « LAI » simulés par Pilote et Bilhyna, puis la relation entre les « LAI » simulés par les deux modèles et ceux mesurés *in situ* pour tous les essais et traitements confondus :

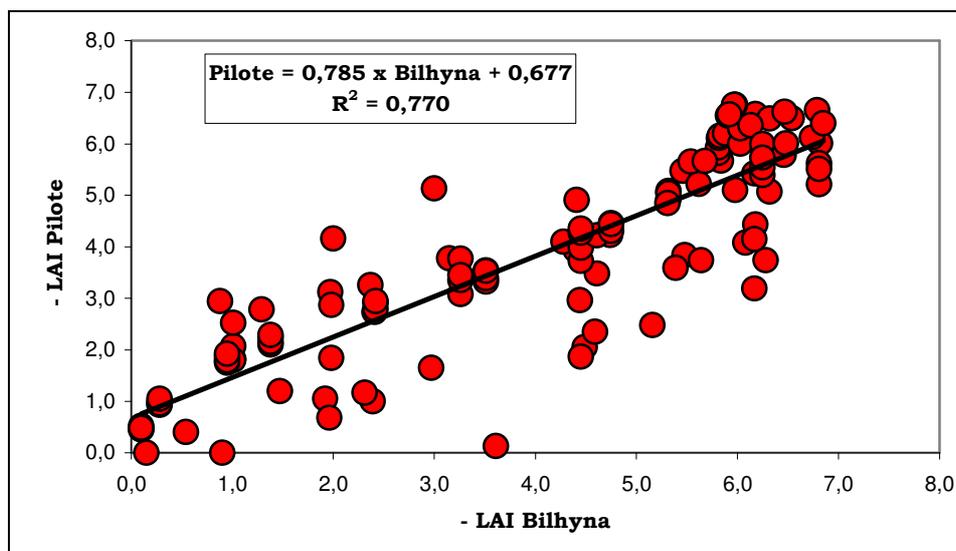


Figure 79 : Relation entre les indices foliaires « LAI » simulés par Pilote et Bilhyna

A partir du graphique ci – dessus nous constatons qu’il existe une relation acceptable ($R^2 = 0.770$) entre les deux paramètres analysés (LAI Pilote et LAI Bilhyna) et ceci a donné lieu à l’équation suivante :

$$LAI_{Pilote} = 0.785 \times R_{Bilhyna} + 0.677 \dots (75)$$

L'analyse de variance de la régression vient ensuite confirmer qu'il s'agit bien d'une relation acceptable eu égard aux probabilités toutes inférieures au seuil de 5% montrant un modèle jugé « *très hautement significatif* » (Annexe 10).

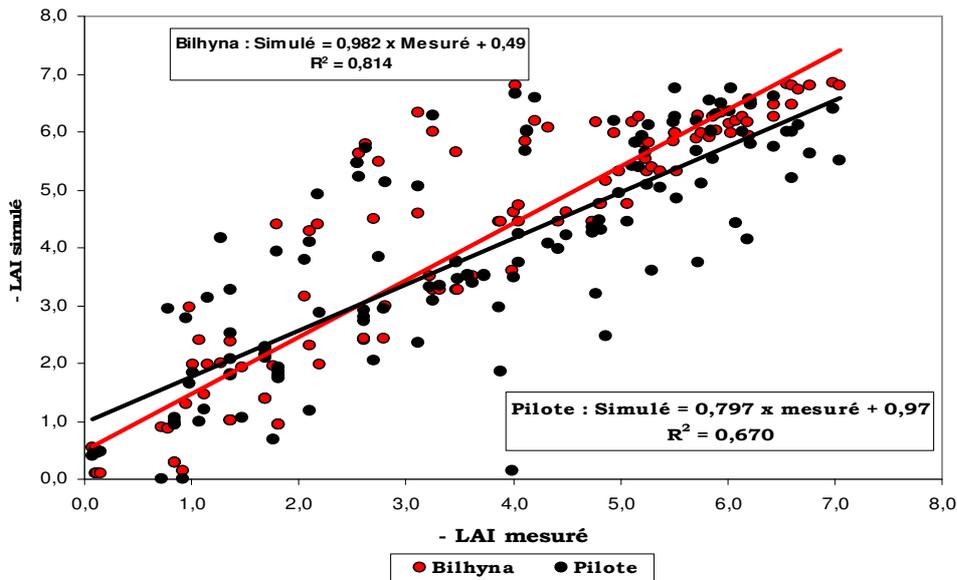


Figure 80 : Relation entre les indices foliaires « LAI » mesurés et simulés par Bilhyna et Pilote

Les deux régressions effectuées pour Bilhyna et Pilote montrent qu'il s'agit de relations largement acceptables eu égard aux coefficients de détermination « $R^2 = 0.814$ » et « $R^2 = 0.670$ » respectivement pour Bilhyna et Pilote. Il semble cependant que le modèle Bilhyna ajuste le mieux les valeurs des indices de surfaces foliaires. Les équations suivantes présentent les relations obtenues entre « LAI simulés » et « LAI mesurés » pour les deux modèles :

$$BILHYNA : LAI_{Simulée} = 0.982 \times LAI_{Mesurée} + 0.49 \dots (76)$$

$$PILOTE : LAI_{Simulée} = 0.797 \times LAI_{Mesurée} + 0.97 \dots (77)$$

L'analyse statistique de ces régressions montre des probabilités insignifiantes (< 5%) confirmant qu'il s'agit bien de relations jugées « *très hautement significatives* » (Annexe 10).

En conclusion, nous pouvons adopter les faits suivants :

- *Les modèles Bilhyna et Pilote permettent d'atteindre des « LAI_{max} » pratiquement aux mêmes périodes, mais présentent cependant des distorsions en phases de croissance et de décroissance.*
- *Le modèle Bilhyna semble mieux être adapté à nos conditions expérimentales en étant beaucoup plus proche des valeurs mesurées.*

A titre récapitulatif de l'analyse de la cinétique de l'indice de surface foliaire « LAI », nous résumons dans le Tableau 37 ci – dessous les valeurs des « LAI_{max} » simulés par les deux modèles utilisés Pilote et Bilhyna et mesurés pour chaque essai et traitement hydrique :

Tableau 37 : Tableau Comparatif des « LAI_{max} » obtenus.

ETM2000	LAI_{max}
Bilhyna	6,49
Pilote	6,76
Mesure	6,47
CV (%)	2,46
ETM2001	
Bilhyna	6,93
Pilote	6,76
Mesure	6,83
CV (%)	1,25
ETM2002	
Bilhyna	6,15
Pilote	6,76
Mesure	6,13
CV (%)	5,64
MOD2000	LAI_{max}
Bilhyna	6,77
Pilote	6,76
Mesure	6,74
CV (%)	0,23
MOD2001	
Bilhyna	6,92

Pilote	6,76
Mesure	6,81
CV (%)	1,20
MOD2002	
Bilhyna	6,00
Pilote	6,76
Mesure	5,93
CV (%)	7,39
SEV2000	LAI_{max}
Bilhyna	6,2
Pilote	6,75
Mesure	6,03
CV (%)	5,95
SEV2001	
Bilhyna	6,92
Pilote	6,76
Mesure	6,77
CV (%)	1,31
SEV2002	
Bilhyna	6,01
Pilote	6,76
Mesure	6,51
CV (%)	5,94
PLU2000	LAI_{max}
Bilhyna	6,15
Pilote	6,76
Mesure	5,89
CV (%)	7,13
PLU2001	
Bilhyna	6,92
Pilote	6,76
Mesure	7,05
CV (%)	2,10
PLU2002	
Bilhyna	5,99
Pilote	6,76
Mesure	6,21
CV (%)	6,28
PLU2003	
Bilhyna	6,81
Pilote	6,76
Mesure	-
CV (%)	0,52
PLU2004	
Bilhyna	6,85
Pilote	6,76
Mesure	6,55
CV (%)	2,29

PLU2005	
Bilhyna	6,56
Pilote	6,77
Mesure	-
CV (%)	2,23

De ce tableau nous pouvons relever que, les « LAI_{max} » simulés lors des différents essais et traitements montrent, clairement, qu'il n'y a pratiquement pas de différences importantes entre les « LAI » estimés par Pilote, Bilhyna et mesurés eu égard aux coefficients de variation relativement très faibles.

IV.- EVOLUTION DES EVAPOTRANSPIRATIONS :

IV.1.- Evapotranspirations Potentielles

Dans un premier temps et afin de tester une éventuelle dérive entre les évapotranspirations potentielles calculées selon Penman – Monteith par les deux modèles Bilhyna et Pilote, nous avons voulu comparer entre les valeurs des ETo obtenues. Ainsi, la Figure 81 montre l'évolution comparée des évapotranspirations potentielles journalières calculées par les deux modèles Pilote et Bilhyna (Période d'essai 2000 – 2005) :

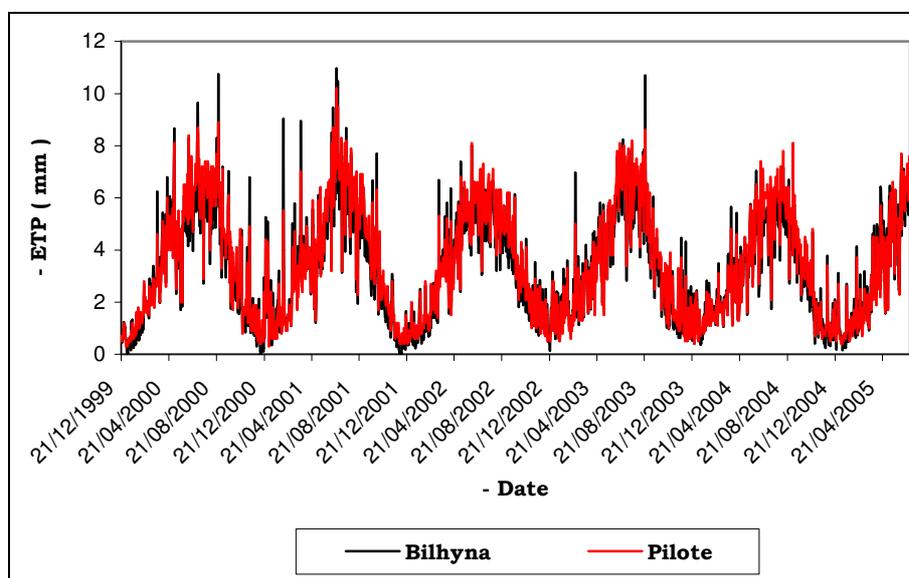


Figure 81 : Evolution de l'évapotranspiration Potentielle calculée par Pilote et Bilhyna (Période d'essai 2000 - 2005)

Nous remarquons, donc, que les « ETo » journalières calculées par les deux modèles sont confondues et la régression effectuée (Figure 82

présentée ci – après) montre clairement qu’il n’existe pas de différences notables entre les deux modes de calcul ($R^2 = 0.952$):

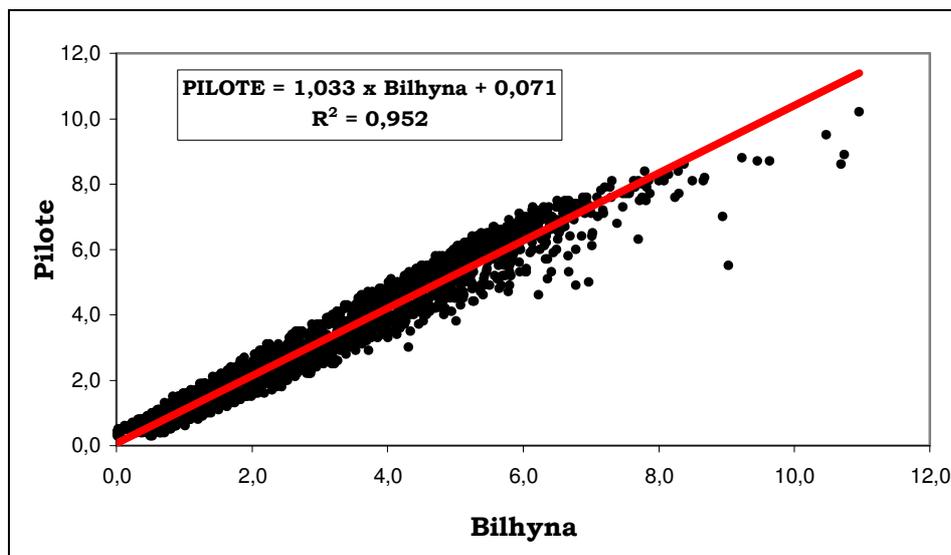


Figure 82 : Relation entre les évapotranspirations potentielles calculées par Pilote et Bilhyna

Cette régression linéaire a donné lieu à l’équation suivante :

$$ETP_{Pilote} = 1.0493 \times ETP_{Bilhyna} \dots\dots\dots (78)$$

L’analyse statistique de la régression vient confirmer que la relation obtenue est acceptable eu égard aux probabilités de 0.0003, 0.0000 et 0.0000 pour respectivement l’ordonnée, la pente et le modèle (Annexe 10). Ces valeurs étant inférieures au risque de 5% choisi la corrélation est donc jugée « *très hautement significative* ».

IV.2.- Evapotranspirations Réelles

Les modèles Pilote et Bilhyna nous ont, également, permis de simuler les évapotranspirations réelles pour chaque essai et traitement hydrique.

Nous ne discuterons ici que les évapotranspirations simulées obtenues pour les traitements extrêmes “ *irrigués* ” et “ *pluviaux* ” concernant les essais 2000,2001 et 2002. Les graphiques réalisés représentant les

évolutions comparées des évapotranspirations réelles journalières et cumulées sont présentés dans ce chapitre :

VI.2.1.- Les évolutions journalières :

IV.2.1.1.- Traitements Pluviaux :

Les graphiques ci-après (figures 83, 84 et 85), montrent respectivement les évolutions comparées des « ETR » journalières simulées par Pilote et Bilhyna pour les campagnes 2000, 2001 et 2002 :

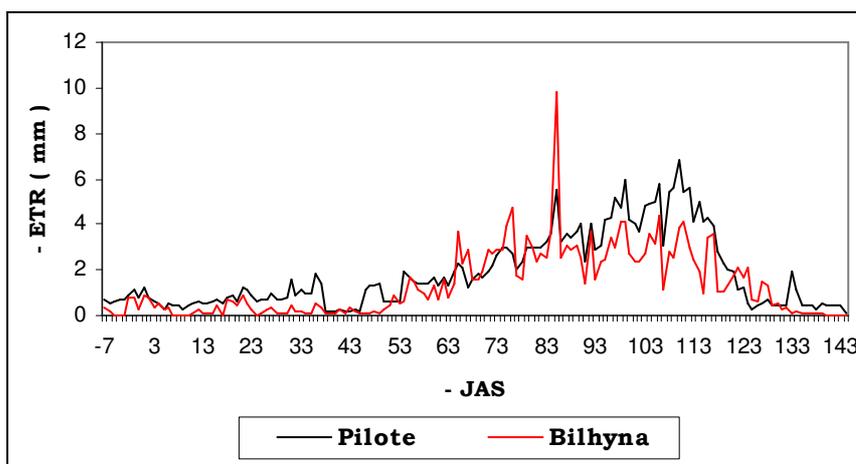


Figure 83 : Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (Traitements PLU, Essai 2000)

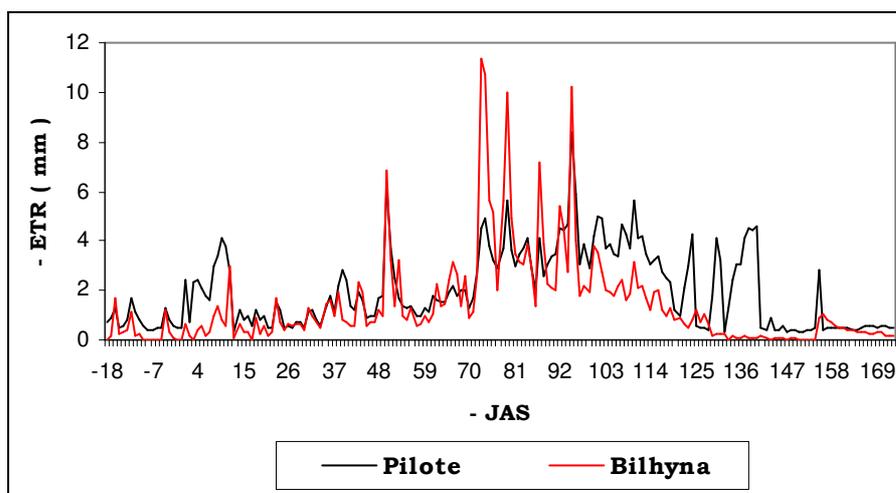


Figure 84 : Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (Traitements PLU, Essai 2001)

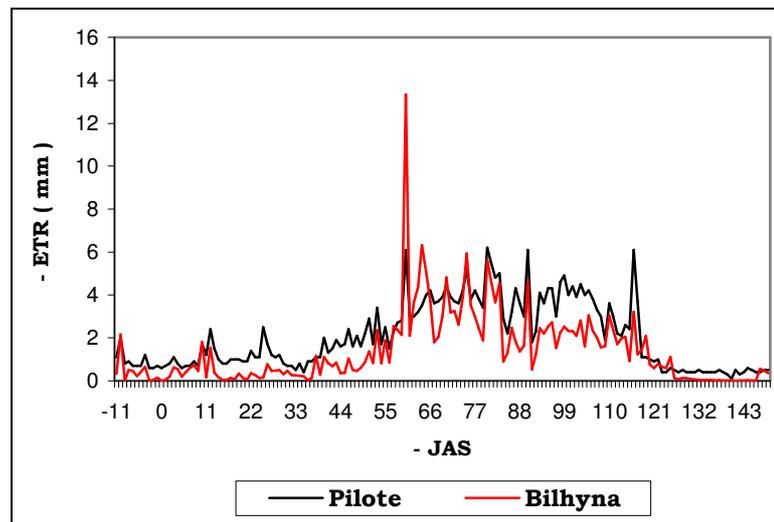


Figure 85 : Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement PLU, Essai 2002*)

Quoiqu'il y ait une similarité dans les tendances générales des évolutions des « ETR » simulées par les deux approches, il faut tout de même noter que pour certaines périodes, essentiellement en fin de cycle, les deux graphiques Bilhyna et Pilote présentent des écarts assez importants. Ceci confirme très bien les analyses faites pour les réserves en eau du sol.

Il faut aussi signaler que Bilhyna a tendance à surestimer les « ETR » par rapport à Pilote surtout en période de pleine croissance végétative, ceci est vraisemblablement lié au modèle de croissance. Notons que les valeurs Maximales obtenues par les deux modèles ont été de :

- Bilhyna : $ETR_{\max} = 13.34$ mm.
- Pilote : $ETR_{\max} = 8.40$ mm.

IV.2.1.2.- Traitements Irrigués :

Les graphiques (figures 86, 87, 88), illustrent respectivement les évolutions comparées des évapotranspirations réelles journalières simulées par Pilote et Bilhyna pour les campagnes 2000, 2001 et 2002 :

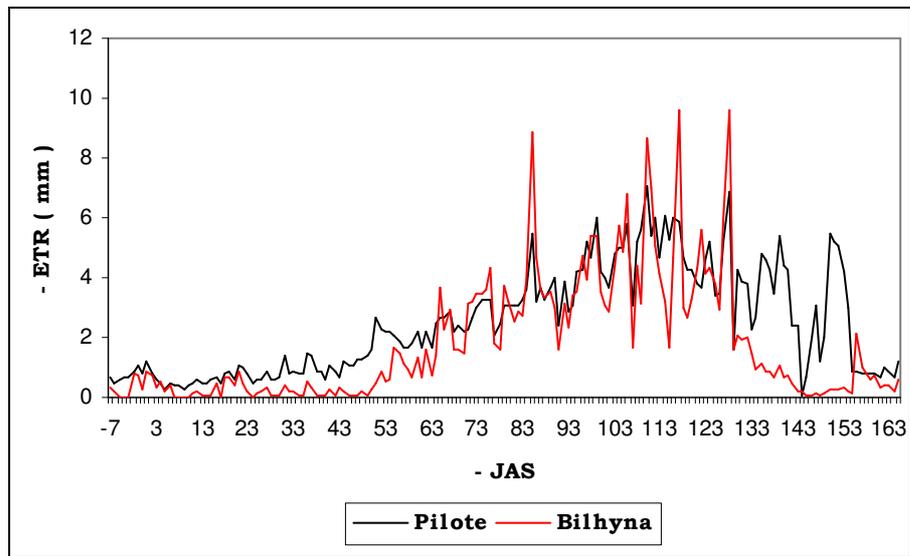


Figure 86 : Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement ETM, Essai 2000*)

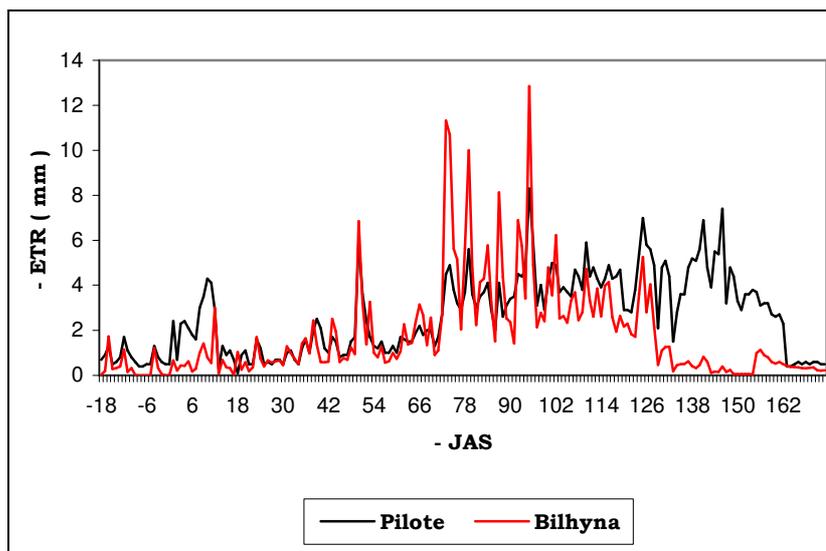


Figure 87 : Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement ETM, Essai 2001*)

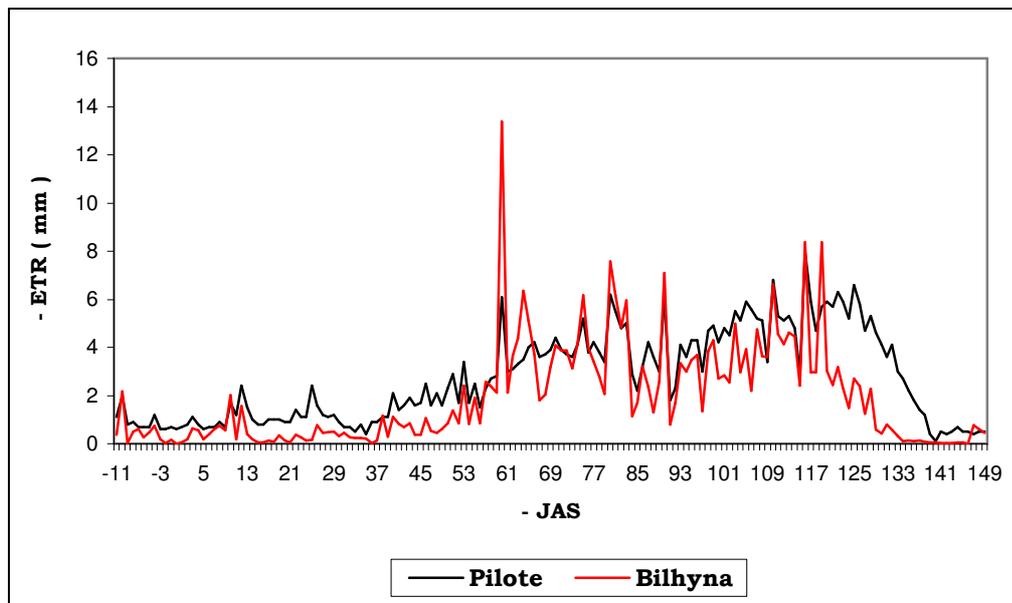


Figure 88 : Evolution de l'évapotranspiration réelle simulée par Pilote et Bilhyna (*Traitement ETM, Essai 2002*)

Les mêmes constatations sont valables ici pour les traitements irrigués avec cependant des écarts un peu plus accentués en fin de cycle et une surestimation des valeurs des « ETR » Bilhyna en période de pleine croissance. Ainsi, les valeurs des « ETR_{max} » obtenues par les deux simulations ont été de :

- Bilhyna : ETR_{max} = 13.37 mm.
- Pilote : ETR_{max} = 8.30 mm.

IV.2.2.- Les évolutions cumulées :

Nous discuterons dans ce qui suit les valeurs cumulées des « ETR » simulées par les deux modèles pour les mêmes traitements hydriques.

IV.2.2.1.- Traitements Pluviaux

Les graphiques (figures 89, 90, 91), représentent respectivement les évolutions comparées des évapotranspirations réelles cumulées pour Pilote et Bilhyna :

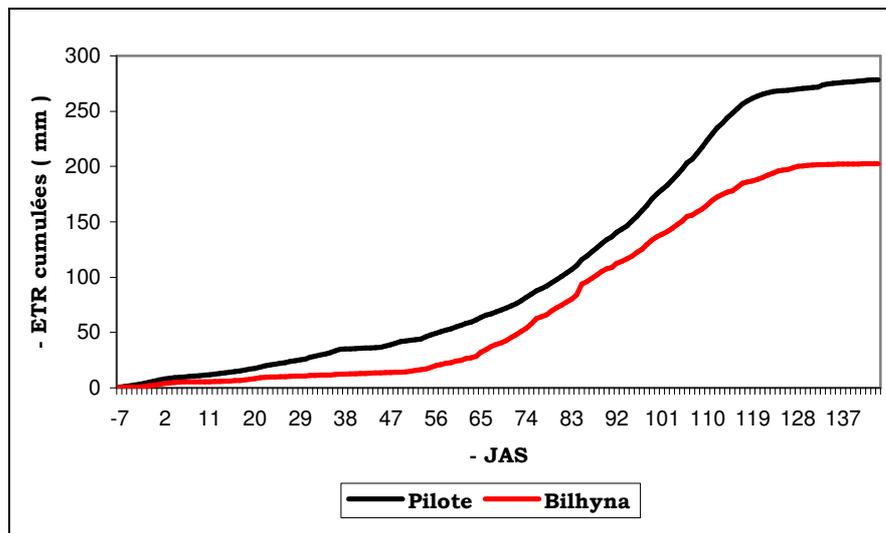


Figure 89 : Evolution des évapotranspirations réelles cumulées
(Traitement PLU, Essai 2000)

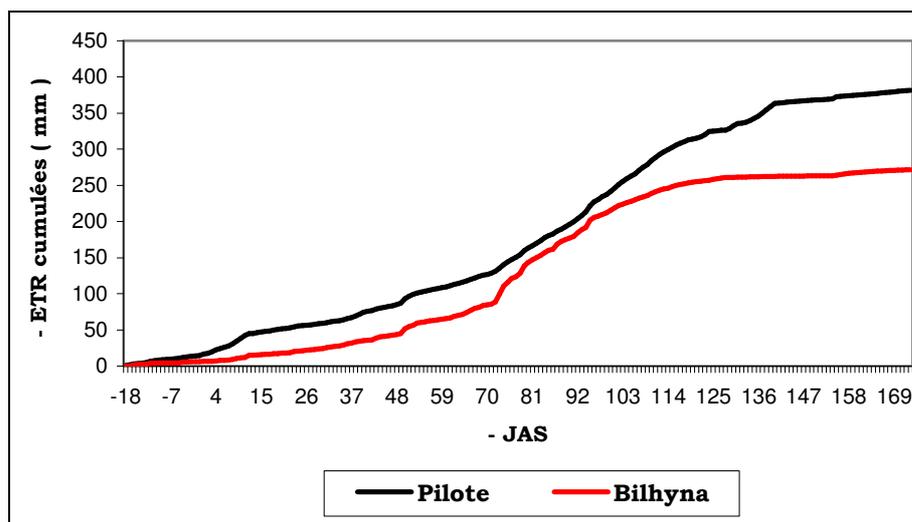


Figure 90 : Evolution des évapotranspirations réelles cumulées
(Traitement PLU, Essai 2001)

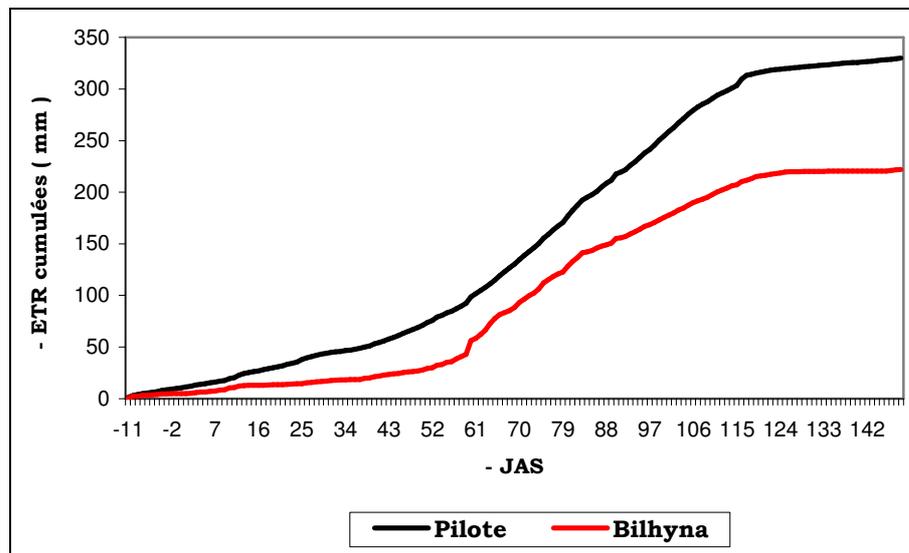


Figure 91 : Evolution des évapotranspirations réelles cumulées
(Traitements PLU, Essai 2002)

Les évolutions des « ETR » cumulées viennent confirmer les conclusions faites sur celles journalières, en ce sens que les écarts entre les deux approches vont en augmentant jusqu'en fin de cycle où l'on arrive à des écarts relativement assez importants . Ainsi, les valeurs des « ETR » obtenues en fin de cycle respectivement pour Pilote et Bilhyna sont montrées dans le Tableau 38 suivant :

Tableau 38 : Comparaison des « ETR » cumulées Pilote – Bilhyna
(Traitements Pluviaux)

ETR	Essai 2000	Essai 2001	Essai 2002
Pilote	278,5	381,9	329,8
Bilhyna	202,37	271,61	221,54
CV (%)	22,39	23,87	27,77

Ce tableau permet de conclure que, même si les écarts entre les « ETR » Pilote et Bilhyna paraissent importants, les coefficients de variation ne sont pas très élevés et donc acceptables.

IV.2.2.2.- Traitements Irrigués :

Les graphiques (figures 92, 93, 94), représentent les évolutions comparées des évapotranspirations réelles cumulées pour Pilote et Bilhyna :

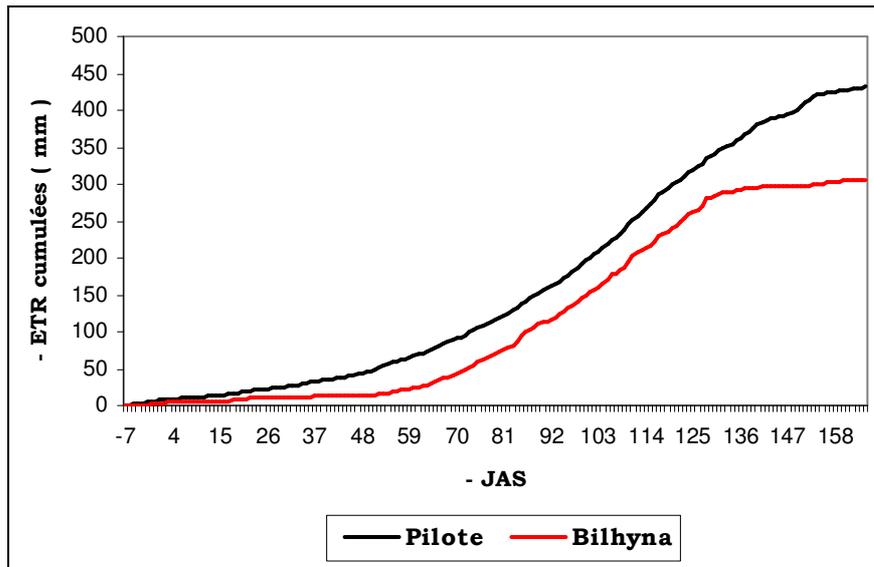


Figure 92 : Evolution des évapotranspirations réelles cumulées
(Traitement ETM, Essai 2000)

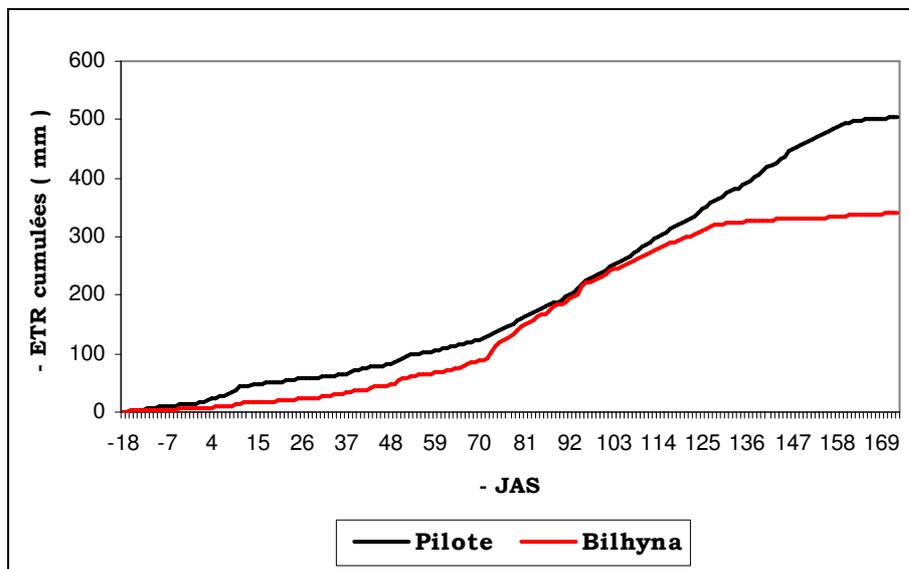


Figure 93 : Evolution des évapotranspirations réelles cumulées
(Traitement ETM, Essai 2001)

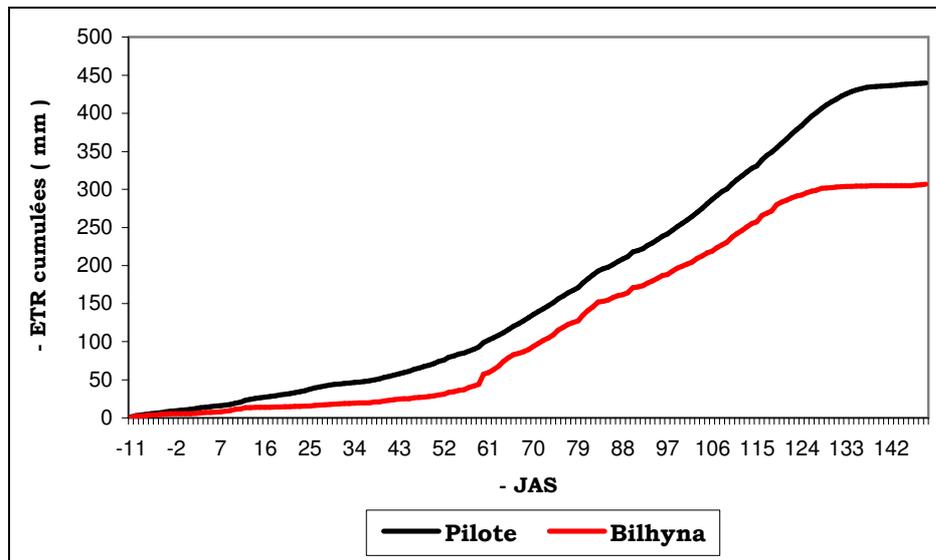


Figure 94 : Evolution des évapotranspirations réelles cumulées
(Traitement ETM, Essai 2002)

Nous pouvons adopter ici les mêmes remarques que celles pour les traitements pluviaux. Le Tableau 39 suivant illustre les écarts obtenus entre les « ETR » cumulées par les deux modèles :

Tableau 39 : Comparaison de « ETR » cumulées Pilote – Bilhyna
(Traitements Irrigués)

ETR	Essai 2000	Essai 2001	Essai 2002
Pilote	431,4	504	439,9
Bilhyna	306,51	340,05	306,5
CV (%)	23,94	27,47	25,28

Ce tableau montre clairement que les coefficients de variation sont quasi semblables à ceux obtenus précédemment.

V.- LES TERMES DU BILAN HYDRIQUE :

Ce chapitre aura pour but de traiter tous les paramètres du bilan hydriques. Nous présenterons donc, uniquement pour les traitements pluviaux et irrigués, les graphiques des valeurs cumulées des termes du bilan hydrique :

- Les Apports d'eau (précipitations + irrigations).
- Les évaporations du sol.
- Les transpirations de la plante.

- Le drainage.
- La variation de la réserve en eau du sol.

V.1.- Traitements Pluviaux :

V.1.1.- Essai 2000 :

Les figures 95 et 96 représentent les évolutions cumulées des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote et Bilhyna :

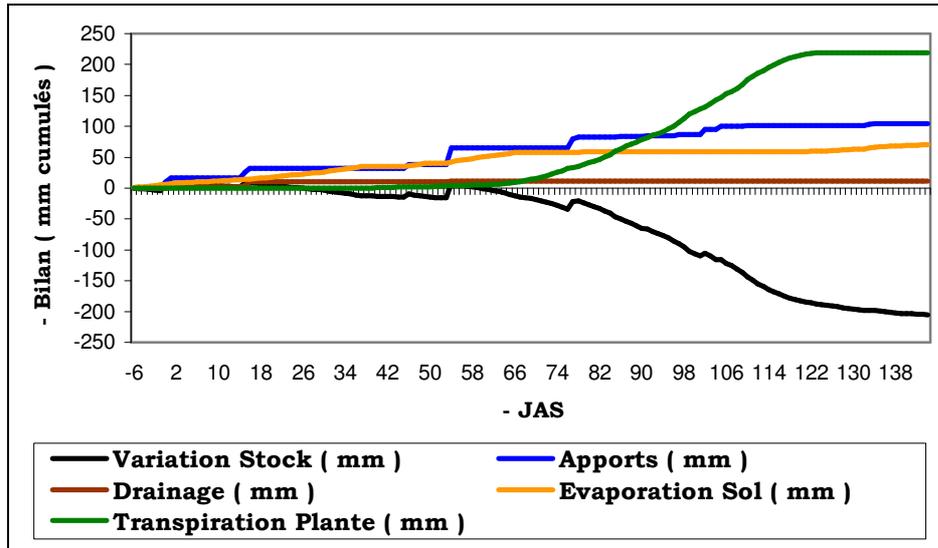


Figure 95 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (*Traitement PLU, Essai 2000*)

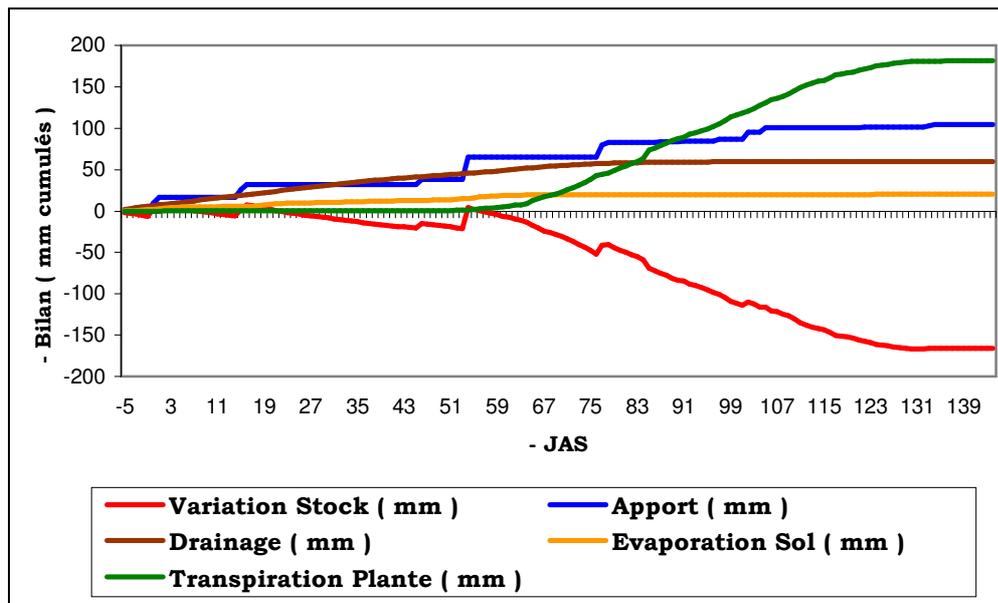


Figure 96 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (*Traitement PLU, Essai 2000*)

Les deux graphiques semblent montrer les mêmes tendances d'évolution pour pratiquement tous les paramètres du bilan. Notons cependant que les courbes cumulées des drainages simulés par Bilhyna (quantité totale drainée = 59.7 mm) sont au – dessus des évaporations du sol, ce qui montre qu'ils sont largement supérieurs à ceux simulés par Pilote (quantité totale drainée = 11.4 mm). Ceci provient du fait que les approches du drainage sont différentes : Pilote est basé sur le principe de " réservoirs " tandis que Bilhyna réalise une résolution numérique de l'équation de Richards pour estimer les drainages.

Il faut aussi remarquer que les transpirations de la plante, pour les deux modèles, passent au – dessus de la courbe des apports aux environs du 92^{ème} JAS pour Pilote et 90^{ème} JAS pour Bilhyna.

En ce qui concerne les évaporations du sol, on note pour les deux modèles, une évolution en début puis une stabilisation jusqu'en fin de cycle du à une couverture complète du sol par la plante. Les valeurs cumulées des évaporations du sol atteintes sont de 70.0 et 20.5 mm pour respectivement Pilote et Bilhyna.

Les variations cumulées des réserves en eau du sol atteignent les valeurs de -205.0 et -166.0 mm pour Pilote et Bilhyna. Ceci dénote donc une apparition d'un stress hydrique ayant obligé la plante à puiser dans la réserve en eau du sol à défaut d'apports pluviométriques. Cette constatation est d'ailleurs bien visible sur les deux graphiques qui montrent des évapotranspirations réelles dépassant largement les apports d'eau à partir des environs du 90^{ème} JAS.

Cette analyse du bilan hydrique de l'essai 2000 montre que cet essai n'a pas donc bénéficié de conditions climatiques favorables à une bonne croissance de la culture du blé et que des apports d'eau d'irrigations étaient nécessaires .

Le Tableau 40 suivant récapitule les valeurs des termes du bilan simulés par Bilhyna et Pilote.

Tableau 40 : Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote
(*Traitement pluvial 2000*)

PLU2000	Esol	Tplante	ETR	Drainage
Bilhyna	18,56	181,06	199,69	53,3
Pilote	61,3	219	269,6	11,3
CV (%)	75,69	13,41	21,07	91,95

Ce tableau montre que si les coefficients de variation paraissent faibles pour la transpiration « *Tplante* » et l'évapotranspiration réelle « *ETR* », ils sont par contre très élevés pour l'évaporation du sol « *Esol* » et le « drainage ».

V.1.2.- Essai 2001 :

Les figures 97 et 98 représentent les évolutions cumulées des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote et Bilhyna

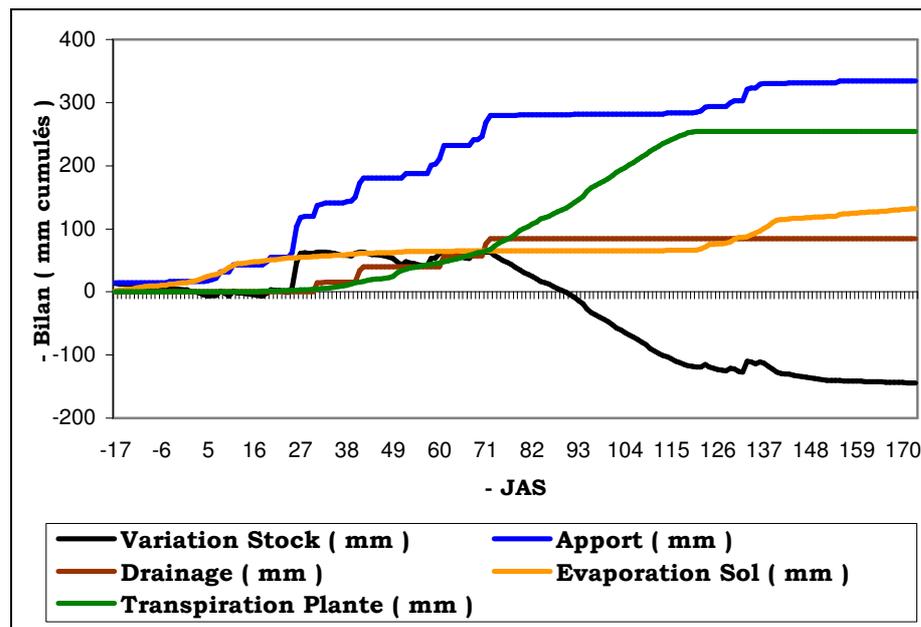


Figure 97 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (*Traitement PLU, Essai 2001*)

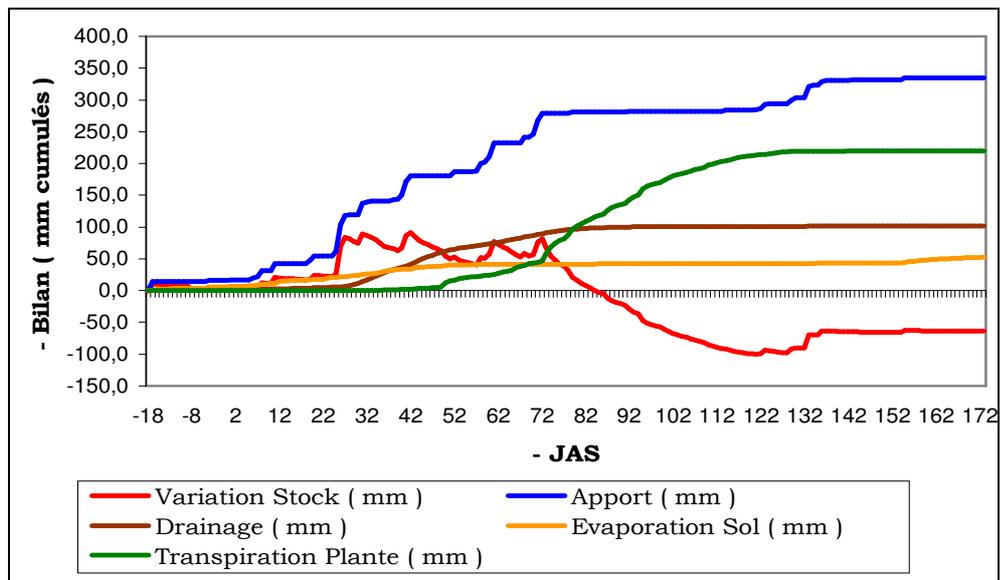


Figure 98 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (*Traitement PLU, Essai 2001*)

Les graphiques précédents du bilan hydrique de l'année 2001 montrent, et ce pour les deux modèles, que les conditions ont été meilleures que l'année précédente 2000, en ce sens que les apports restent nettement au-dessus des évapotranspirations réelles et que les variations de la réserve en eau du sol n'ont pas été trop importantes.

En ce qui concerne les comparaisons entre Bilhyna et Pilote, les graphiques montrent que l'on a affaire aux mêmes tendances évoquées précédemment (essai 2000).

Le Tableau 41 suivant récapitule les termes cumulés du bilan hydrique de l'essai 2001 :

Tableau 41 : Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote (*Traitement pluvial 2001*)

PLU2001	Esol	Tplante	ETR	Drainage
Bilhyna	36,9	218,97	255,78	100,09
Pilote	76,2	254,4	325,9	84,8
CV (%)	49,14	10,58	17,05	11,70

Pour cet essai, seule l'évaporation du sol semble présenter une variation importante (CV = 49%) entre les deux approches Bilhyna et Pilote, les autres paramètres montrant des coefficients acceptables.

V.1.3.- Essai 2002 :

Les figures 99 et 100 illustrent les évolutions cumulées des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote et Bilhyna :

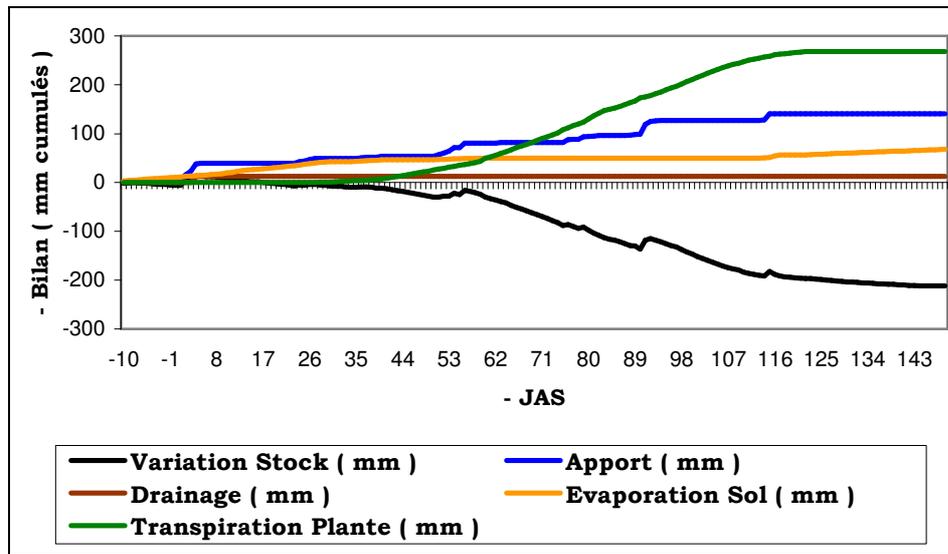


Figure 99 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (Traitement PLU, Essai 2002)

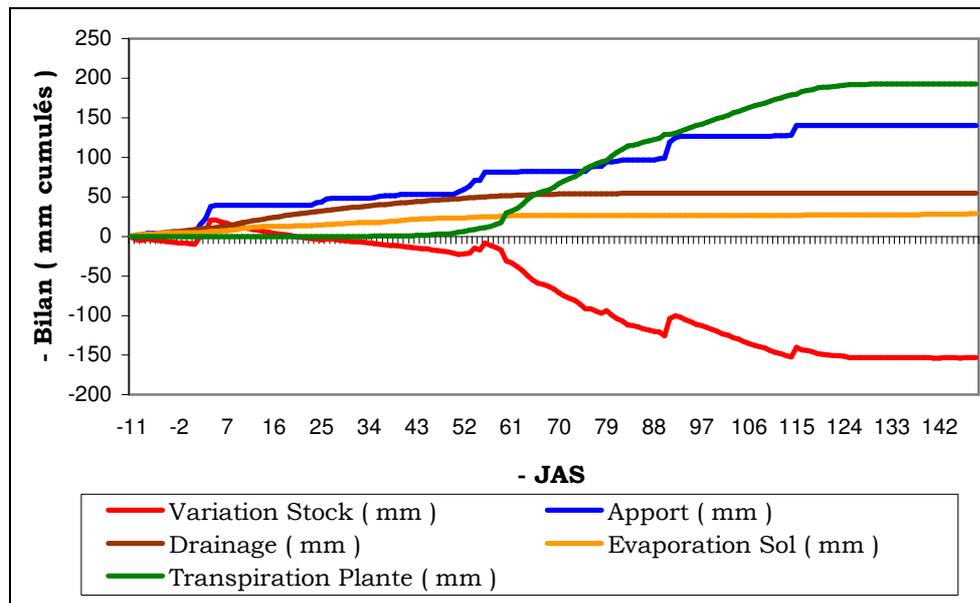


Figure 100 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (Traitement PLU, Essai 2002)

L'essai 2002 se rapproche le plus à celui de 2000 en ce sens qu'il accuse un déficit montré par des courbes de transpiration dépassant celle des apports à partir du 70^{ème} et 76^{ème} JAS respectivement pour Pilote et Bilhyna. Les variations de la réserve en eau du sol ont atteint les valeurs

de -212.0 et 154.0 mm pour Pilote et Bilhyna montrant un épuisement assez important du stock d'eau.

Le Tableau 42 suivant récapitule les valeurs cumulées des termes du bilan hydrique pour cet essai :

Tableau 42 : Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote
(*Traitement pluvial 2002*)

PLU2002	Esol	Tplante	ETR	Drainage
Bilhyna	22,6	192,09	214,7	47,64
Pilote	48,2	267,8	310,2	12,7
CV (%)	51,14	23,28	25,73	81,89

Cet essai montre encore une fois que les coefficients de variation sont assez élevés pour les paramètres " *Esol* " et " *Drainage* ".

V.2.- Traitements Irrigués :

V.2.1.- *Essai 2000* :

Les figures 101 et 102 montrent les évolutions cumulées des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote et Bilhyna :

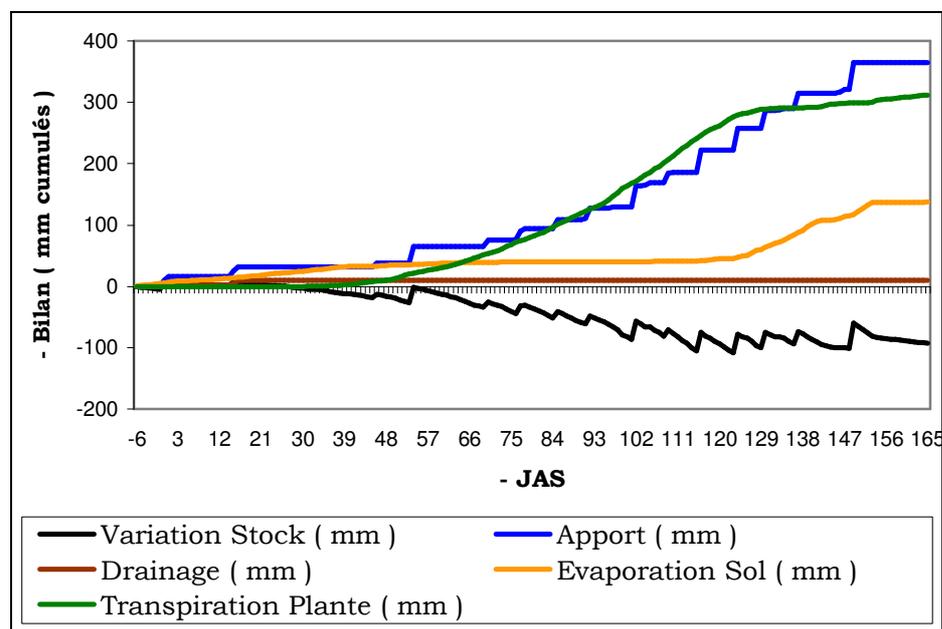


Figure 101 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (*Traitement ETM, Essai 2000*)

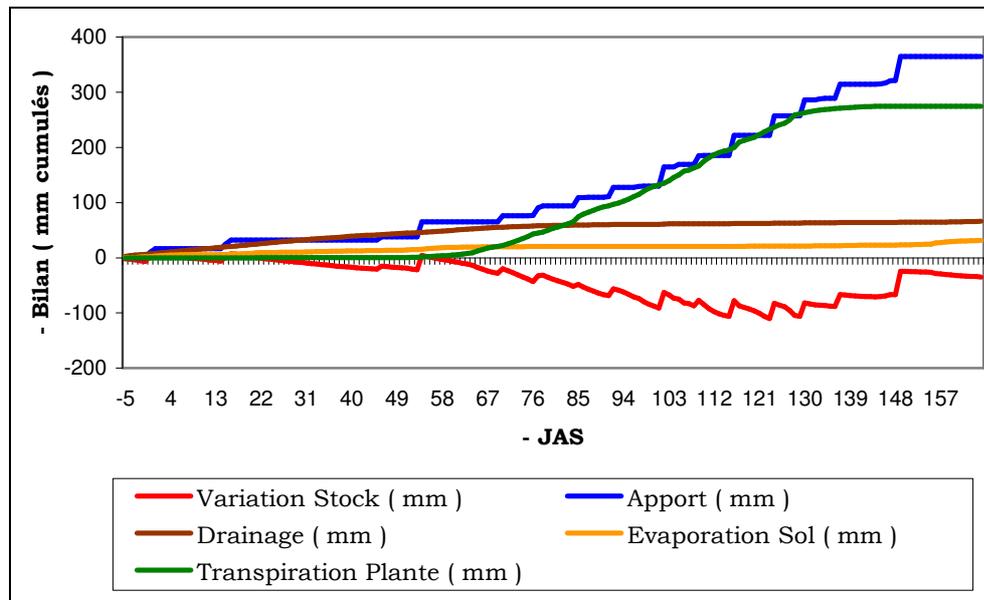


Figure 102 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (*Traitement ETM, Essai 2000*)

Les graphiques ci-dessus montrent, comparativement à ceux du traitement pluvial, l'effet des irrigations sur la modification du bilan hydrique. En effet, les courbes répondent bien aux irrigations qui influencent de façon remarquable le déroulement du bilan hydrique. Ainsi, contrairement au traitement pluvial, l'on note ici que les irrigations (dose total apportée = 237 mm) ont permis de maintenir la courbe des apports au-dessus de celle correspondant à l'évapotranspiration et donc de réduire l'effet du stress hydrique. La variation de la réserve en eau du sol atteinte en fin d'essai a été de -93.0 et -35.0 mm (contre -205.0 et -166.0 mm) pour respectivement Pilote et Bilhyna.

Le Tableau 43 suivant résume les termes du bilan hydrique obtenus par les deux modèles :

Tableau 43 : Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote (*Traitement Irrigué 2000*)

ETM2000	Esol	Tplante	ETR	Drainage
Bilhyna	20,64	274,16	294,77	57,55
Pilote	102,70	292,40	382,20	10,20
CV (%)	94,09	4,55	18,26	98,84

Les mêmes remarques restent valables pour les paramètres du bilan hydrique (CV trop élevés pour « *Esol* » et « *Drainage* »).

V.2.2.- Essai 2001 :

Les figures 103 et 104 montrent les évolutions cumulées des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote et Bilhyna :

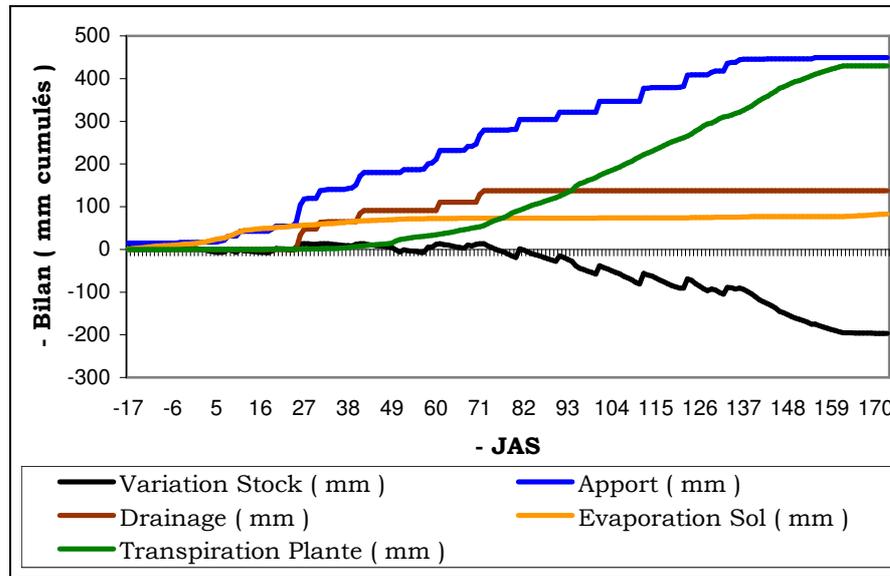


Figure 103 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (*Traitement ETM, Essai 2001*)

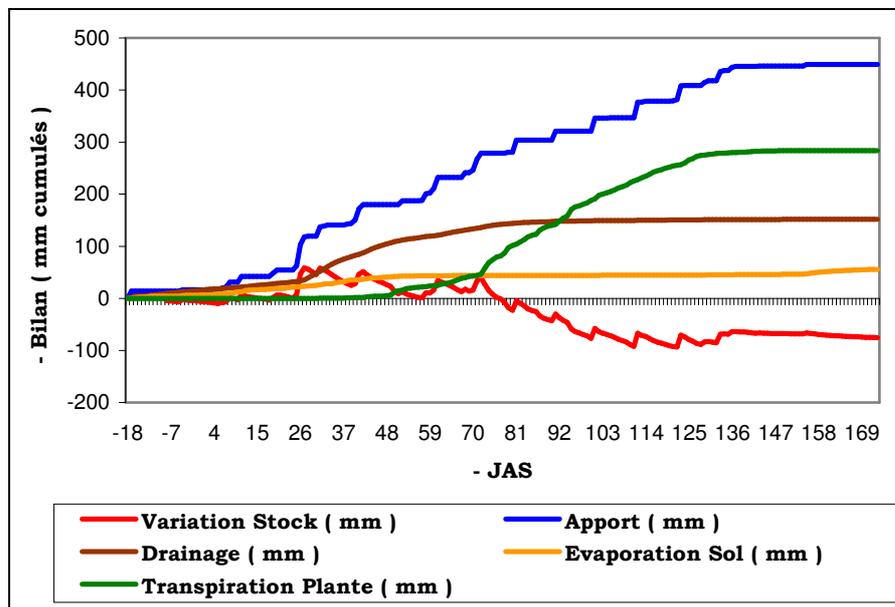


Figure 104 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (*Traitement ETM, Essai 2001*)

Ces graphiques montrent une fois de plus que la campagne d'essai 2001 a bénéficié d'apports (précipitations et irrigations) suffisants pour

éviter un stress hydrique important . Les variations de la réserve en eau du sol ont atteint les valeurs de -197.0 et -76.0 mm pour Pilote et Bilhyna. Le Tableau 44 suivant montre les valeurs cumulées des termes du bilan hydrique Pilote et Bilhyna :

Tableau 44 : Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote
(*Traitement Irrigué 2001*)

ETM2001	Esol	Tplante	ETR	Drainage
Bilhyna	39,84	282,98	322,82	135,84
Pilote	63,30	358,80	412,90	137,40
CV (%)	32,17	16,71	17,32	0,81

V.2.3.- Essai 2002 :

Les figures 105 et 106 présentent les évolutions cumulées des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote et Bilhyna :

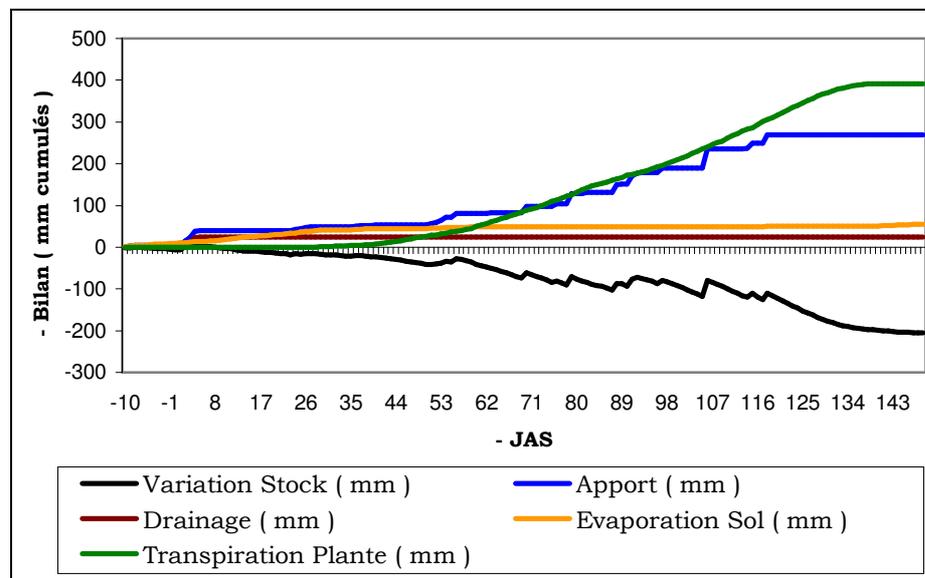


Figure 105 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Pilote (*Traitement ETM, Essai 2002*)

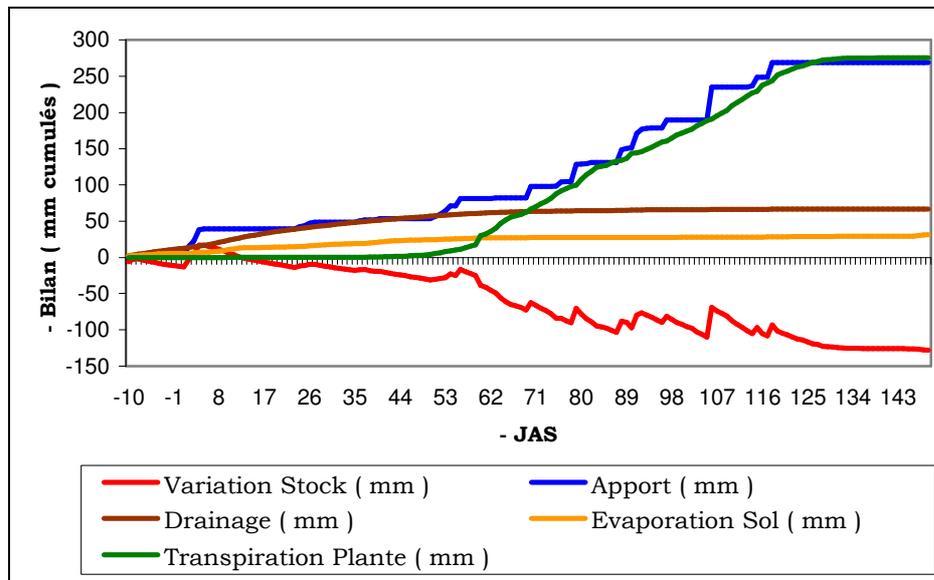


Figure 106 : Evolution des paramètres du bilan hydrique simulés par Bilhyna (*Traitement ETM, Essai 2002*)

En ce qui concerne l'évaporation du sol, nous pouvons observer qu'elle est plus importante pour Pilote (55.4 mm) que Bilhyna (31.3 mm) en raison du fait que Bilhyna prend en compte l'effet du « mulch » limitant l'évaporation du sol.

Le modèle Bilhyna donne une estimation du drainage (66.8 mm) largement plus importante que Pilote (23.9 mm) .

Le Tableau 45 suivant résume les paramètres du bilan hydrique Pilote et Bilhyna :

Tableau 45 : Paramètres du bilan hydrique Bilhyna et Pilote (*Traitement Irrigué 2002*)

ETM2002	Esol	Tplante	ETR	Drainage
Bilhyna	23,61	274,48	298,03	55,63
Pilote	41,50	378,40	412,60	23,90
CV (%)	38,86	22,51	22,80	56,42

En conclusion de l'analyse des bilans hydriques, nous pouvons noter les résultats suivants :

- Les tendances générales des termes du bilan hydrique simulés par Bilhyna et Pilote s'accordent convenablement.
- Des différences remarquables sont cependant notées pour l'évaporation du sol (en raison du mulch) et le drainage

(approches « réservoirs » par Pilote et « Richards » par Bilhyna) .

- *Les écarts entre les transpirations simulées par les deux modèles semblent être acceptables.*

VI.- SIMULATIONS DES IRRIGATIONS :

Dans cette partie, nous traiterons de “l’automatisation” des irrigations par les modèles Bilhyna et Pilote. Cette simulation automatique des irrigations nous permettra de :

- *Faire une comparaison entre les deux approches sur les doses et nombres d’irrigations simulées dans le contexte de nos conditions expérimentales*
- *Evaluer les régimes hydriques réellement effectués dans le cadre des différents protocoles d’essai.*

Afin de pouvoir réaliser ces objectifs, nous avons adopté deux stratégies d’irrigation pour la simulation “ automatique ” :

- L’une basée sur un déclenchement de l’irrigation dès que la réserve en eau du sol est épuisée à **20%** avec un comblement total du déficit (reconstitution de la réserve).
- L’autre basée sur un déclenchement de l’irrigation dès que la réserve en eau du sol est épuisée à **50%** avec un comblement total du déficit (reconstitution de la réserve).

Il faut cependant signaler que, là aussi, les deux approches présentent des différences en ce sens que pour Pilote on doit renseigner la dose d’irrigation à apporter tandis que Bilhyna réalise lui – même les calculs de doses. Les doses renseignées pour Pilote ont été calculées par nos soins en fonction du taux d’épuisement de la réserve et de la profondeur maximale racinaire. Ainsi, les doses fixées pour les deux scénarios ont été de 48.0 mm (20 %) et 120.0 mm (50 %).

Il faut noter que le premier scénario (20% épuisement de la réserve) n’est pas justifié dans le cadre de la stratégie d’irrigation des céréales,

mais prévu seulement pour pouvoir réaliser des comparaisons avec les irrigations des traitements ETM.

Nous nous limiterons dans cette analyse aux seules campagnes d'irrigation des essais 2000, 2001 et 2002.

VI.1.- Irrigations à 20 % d'épuisement de la réserve :

VI.1.1.- *Essai 2000* :

La Figure 107 représente l'évolution des irrigations simulées par les modèles Pilote et Bilhyna pour l'essai 2000 :

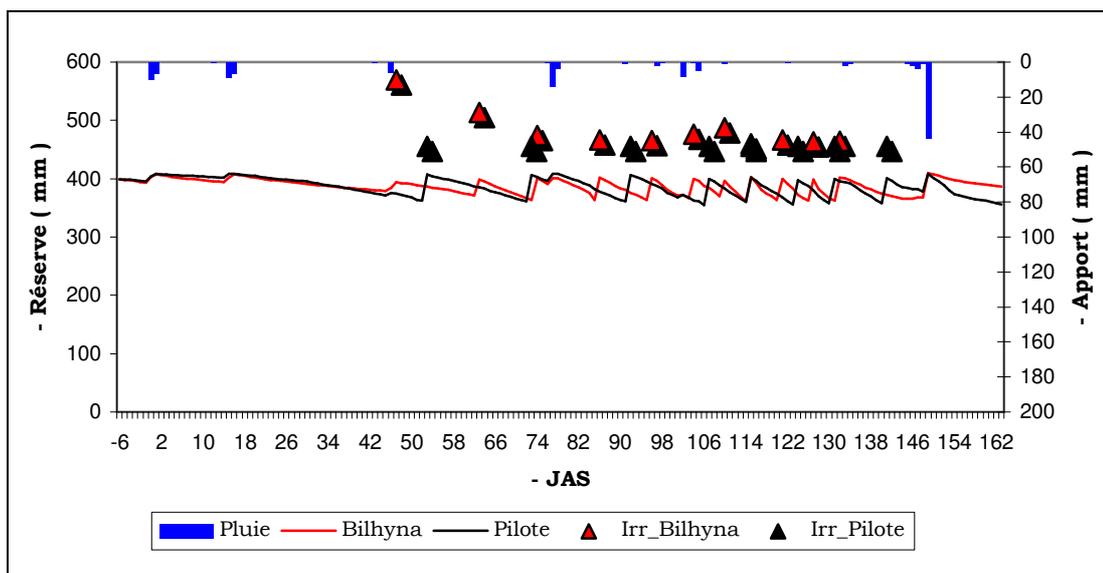


Figure 107 : Simulation des irrigations (*Essai 2000*)

Pour cet essai le modèle Pilote propose une première irrigation le 53^{ème} JAS (Stade plein tallage) et à terme un total de huit (08) irrigations de 48 mm chacune cumulant ainsi une quantité totale de 384.0 mm durant tout le cycle végétatif, alors que Bilhyna déclenche une première irrigation le 47^{ème} JAS (dose = 10.5 mm) et cumule un total de 11 irrigations (quantité totale = 431.0 mm). Hormis les trois irrigations simulées par Pilote et Bilhyna avant le 73^{ème} JAS et celle simulée par Pilote le 141^{ème} JAS, nous notons une concordance plus ou moins valable entre dates des apports des irrigations par les deux modèles .

Les doses d'irrigations simulées à l'aide des deux modèles n'ont pas entraîné de différence significative entre les réserves en eau du sol simulée par Pilote et Bilhyna. Ceci nous permet de dire que la prise en compte du

pourcentage d'épuisement de la réserve de 20% est suffisant pour la maintenir aux environs de la capacité au champs.

Le Tableau 46 résume le nombre et les doses d'irrigations simulées par les deux modèles Pilote et Bilhyna durant le cycle de développement de la culture.

Tableau 46 : Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (*Essai 2000*)

JAS	Doses d'irrigations (mm)		
	Bilhyna	Pilote	Essai
47	10.3		
53		48.0	
54			27.0
63	28.9		
70			11.0
73		48.0	
74	42.0		
85			15.0
86	44.6		
91			17.0
92		48.0	
96	44.8		
102			26.0
104	41.2		
107		48.0	
109			16.0
110	37.5		
115	46.6	48.0	
116			36.0
121	44.4		
124		48.0	35.0
127	45.5		
130			29.0
131		48.0	
132	45.2		
137			25.0
141		48.0	
Dose totale, mm	431.0	384.0	237.0
Nombre d'irrigation	11	08	10

La quantité totale des apports par irrigations simulées par Pilote et Bilhyna ne semblent pas présenter des différences importantes. Le nombre des irrigations " réelles " du traitement ETM de l'essai 2000 se rapproche de celui de Bilhyna , mais les doses pratiquées ont été très insuffisantes (237.0 mm contre 431.0 pour Bilhyna).

VI.1.2.- *Essai 2001* :

La Figure 108 représente l'évolution des irrigations simulées par les modèles Pilote et Bilhyna pour l'essai 2001 :

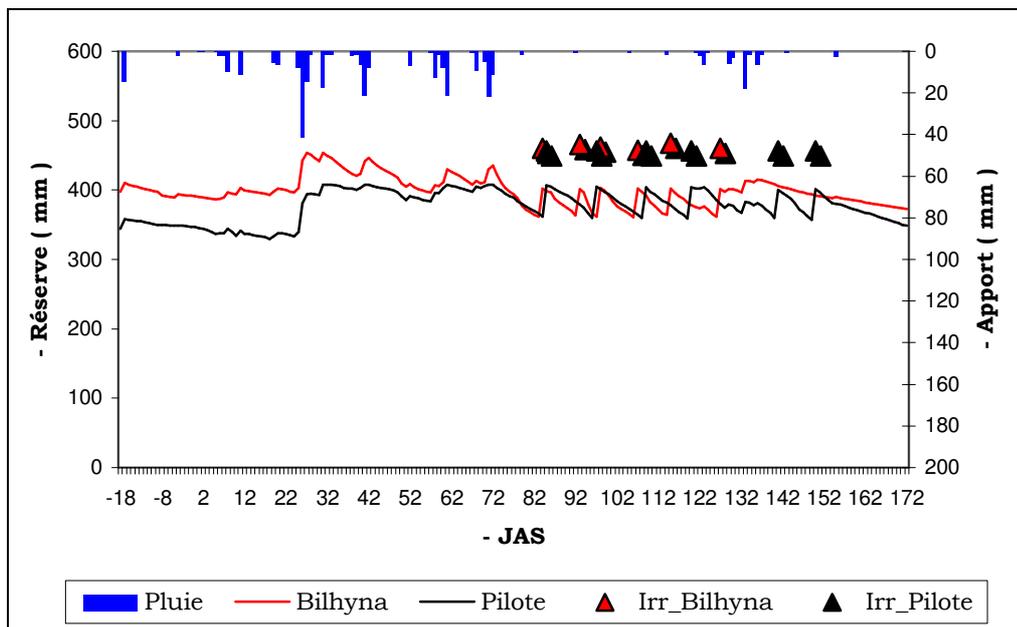


Figure 108 : Simulation des irrigations (*Essai 2001*)

Nous pouvons constater à partir de la représentation graphique que les modèles Pilote et Bilhyna prévoient 06 irrigations chacun avec des doses respectives très proches (autour de 48.0 mm). La première irrigation est déclenchée pratiquement au même moment (85^{ème} JAS par Pilote et 84^{ème} JAS par Bilhyna).

Le Tableau 47 présente le nombre et doses d'irrigations simulées par les deux modèles.

Tableau 47 : Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (*Essai 2001*)

JAS	Doses d'irrigations (mm)		
	Bilhyna	Pilote	Essai
81			23.0
84	46.6		
85		48.0	
91			17.0
93	44.9		
97		48.0	
98	46.1		
101			25.0
107	47.5		
109		48.0	
112			30.0
115	44.0		

120		48.0	
123			20.0
127	46.6		
141		48.0	
150		48.0	
Dose totale	275.7	288.0	115.0
Nombre d'irrigation	06	06	05

Ce tableau montre tout d'abord que les irrigations simulées par Pilote et Bilhyna sont identiques (même nombre d'irrigations et doses très proches), puis que l'essai ETM 2001 a bénéficié seulement de 5 irrigations à doses faibles (en raison de contraintes liées à une défection du matériel d'irrigation).

VI.1.3.- *Essai 2002* :

La Figure 109 illustre l'évolution des irrigations simulées par les modèles Pilote et Bilhyna pour l'essai 2002 :

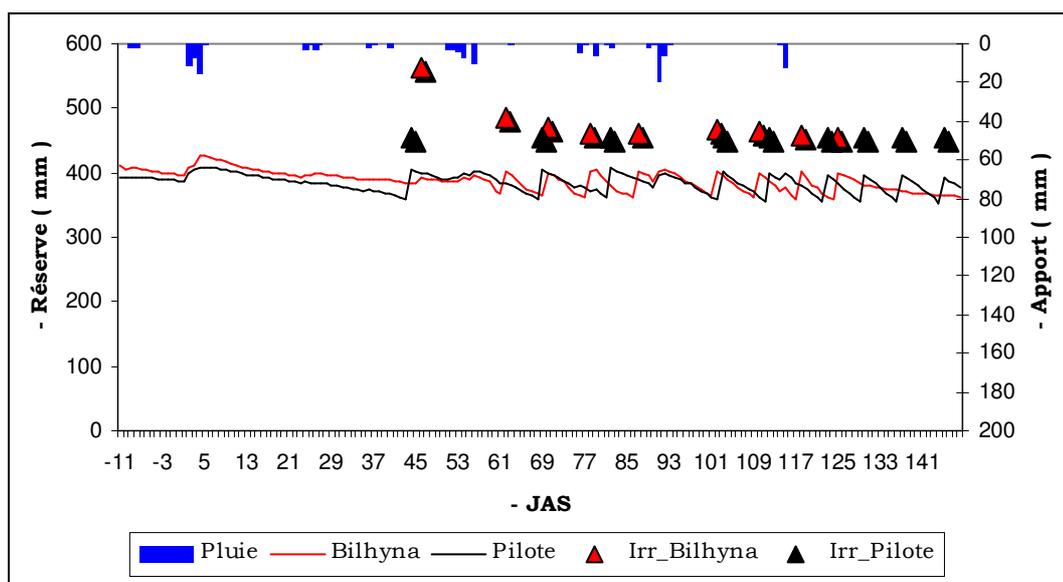


Figure 109 : Simulation des irrigations (*Essai 2002*)

Les modèles Pilote et Bilhyna ont simulé pour cette campagne un nombre identique de 9 irrigations. Les premières irrigations ont été déclenchées au 44^{ème} JAS par Pilote et au 46^{ème} JAS par Bilhyna, ce qui correspond au stade de plein tallage.

Le Tableau 48 ci – après récapitule le nombre et doses d'irrigations simulées par les deux modèles.

Tableau 48 : Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (*Essai 2002*)

JAS	Doses d'irrigations (mm)		
	Bilhyna	Pilote	Essai
44		48.0	
46	12.0		
62	38.3		
69		48.0	
70	43.7		16.0
78	46.2		
79			18.0
82		48.0	
87	46.0		
88			18.0
97			11.0
102	44.3		
103		48.0	
106			45.0
110	45.7		
112		48.0	
118	47.8		20.0
123		48.0	
125	48.2		
130		48.0	
137		48.0	
145		48.0	
Dose totale	372.3	432.0	128.0
Nombre d'irrigation	09	09	06

Là aussi, les irrigations simulées pour l'essai 2002 par les deux modèles semblent donner des résultats concordants (même nombre d'irrigation et doses assez proches). Par contre, la stratégie d'irrigation concernant le traitement ETM 2002 est loin d'être justifiée par les simulations (doses trop faibles entraînant un écart important avec les irrigations "automatiques").

VI.2.- Traitements R50% :

VI.2.1.- *Essai 2000* :

La Figure 110 représente l'évolution des irrigations simulées par les modèles Pilote et Bilhyna pour l'essai 2000 :

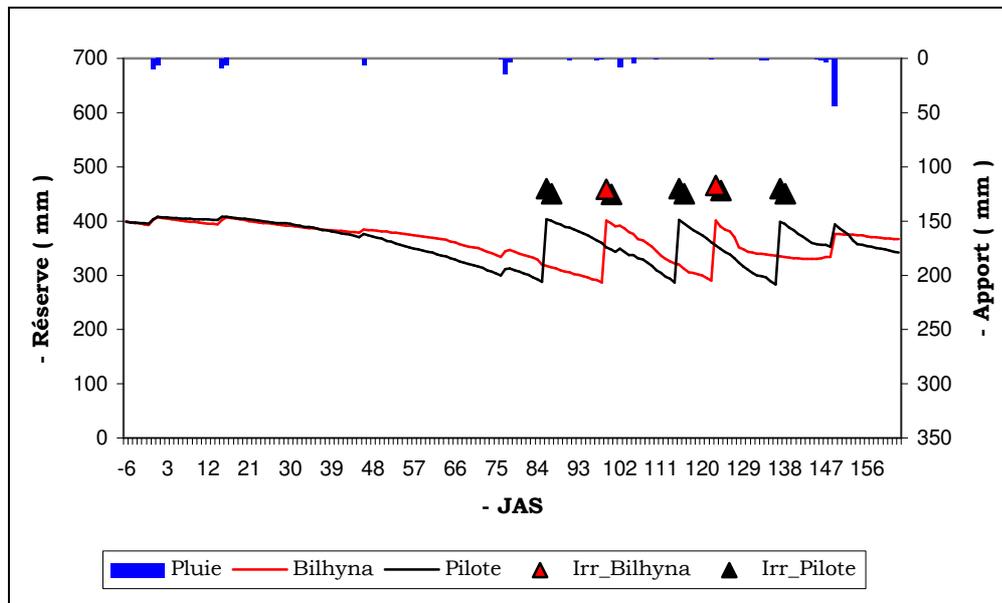


Figure 110 : Simulation des irrigations (*Essai 2000*)

Nous constatons ici que le modèle Pilote propose 03 irrigations durant le cycle de la culture avec une première irrigation de 120.0 mm le 86^{ème} JAS, alors que Bilhyna prévoit uniquement deux irrigations de 120.36 mm le 99^{ème} JAS et 117.07 mm le 123^{ème} JAS.

Malgré que cet essai ait connu une pluviométrie faible durant toute la période, les deux modèles ne simulent pas de nombreuses irrigations mais les quantités proposées sont importantes et permettent une reconstitution complète de la réserve en eau du sol.

Le Tableau 49 résume le nombre et doses d'irrigations simulées par les deux modèles.

Tableau 49 : Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (*Essai 2000*)

JAS	Doses d'irrigations (mm)	
	Bilhyna	Pilote
86		120.0
99	120.4	
115		120.0
123	117.1	
137		120.0
Dose totale	237.4	360.0
Nombre d'irrigation	02	03

VI.2.2.- *Essai 2001* :

La Figure 111 représente l'évolution des irrigations simulées par les modèles Pilote et Bilhyna pour l'essai 2001 :

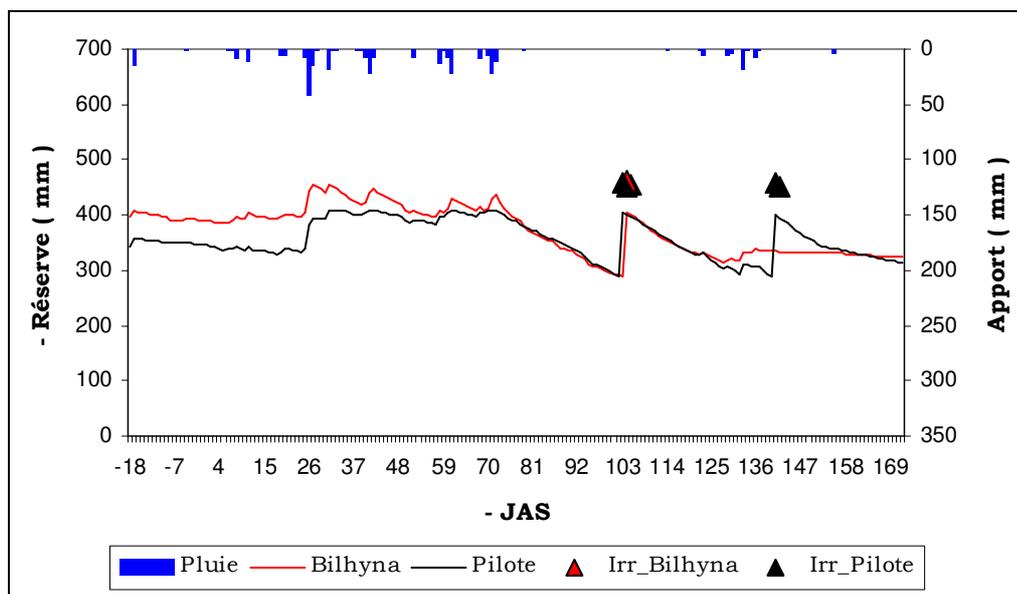


Figure 111 : Simulation des irrigations (*Essai 2001*)

De même que pour l'essai 2000, durant cet campagne 2001 les deux modèles Pilote et Bilhyna proposent respectivement deux irrigations le 103^{ème} et 141^{ème} JAS et une irrigation le 104^{ème} JAS. Ces doses ont suffi à reconstituer la réserve épuisée à 50%.

Le Tableau 50 récapitule le nombre et doses d'irrigations simulées par les deux modèles.

Tableau 50 : Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (*Essai 2001*)

JAS	Doses d'irrigations (mm)	
	Bilhyna	Pilote
103		120.0
104	119.5	
141		120.0
Dose totale	119.5	240.0
Nombre d'irrigation	01	02

VI.2.3.- *Essai 2002* :

La Figure 112 représente l'évolution des irrigations simulées par les modèles Pilote et Bilhyna pour l'essai 2002 :

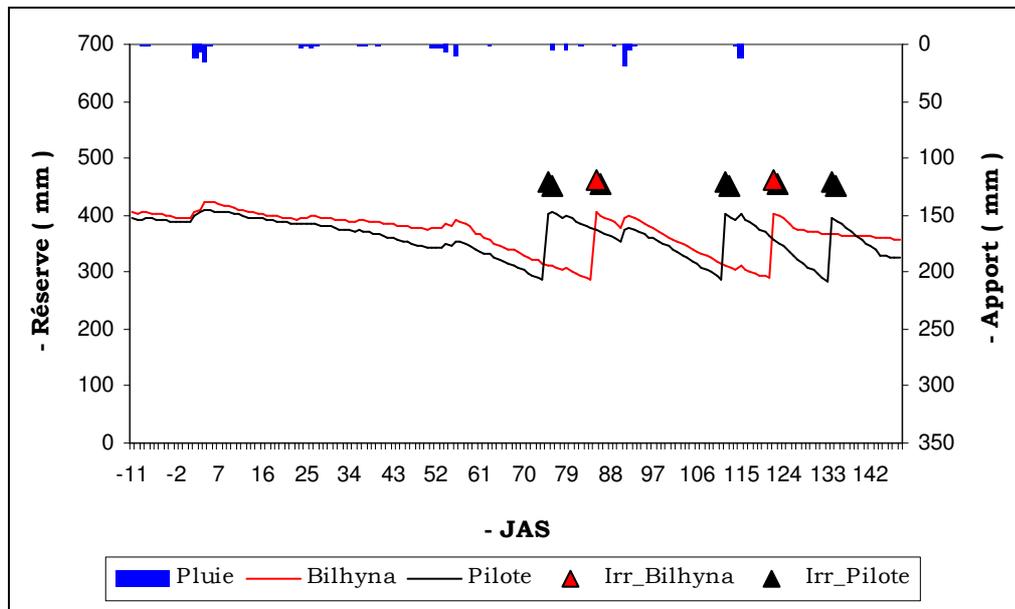


Figure 112 : Simulation des irrigations (*Essai 2002*)

Cette campagne expérimentale a connu de faibles précipitations pas bien réparties durant la période d'essai et engendrant un manque d'eau pour la culture. Cependant, les deux modèles Pilote et Bilhyna prévoient respectivement un total de 3 et 2 irrigations seulement.

Le Tableau 51 ci – dessous présente le nombre et doses d'irrigations simulées par les deux modèles.

Tableau 51 : Irrigations simulées par Pilote et Bilhyna (*Essai 2002*)

JAS	Doses d'irrigations (mm)	
	Bilhyna	Pilote
75		120.0
85	119.2	
112		120.0
122	118.4	
134		120.0
Dose totale	237.6	360.0
Nombre d'irrigation	2	3

VII.- INTERPRETATION DU MULCH :

Nous rappelons que seul le modèle Bilhyna prend en compte l'effet du mulch dans la modélisation. Dans cette partie, nous discuterons l'effet du mulch sur essentiellement les évaporations du sol pour les essais pluviaux 2000, 2001 et 2002.

La Figure 113 représente une évolution comparée des épaisseurs du mulch et de la couche superficielle du sol simulée par le modèle Bilhyna pour tous les essais effectués durant la période 2000 à 2002 pour le traitement pluvial :

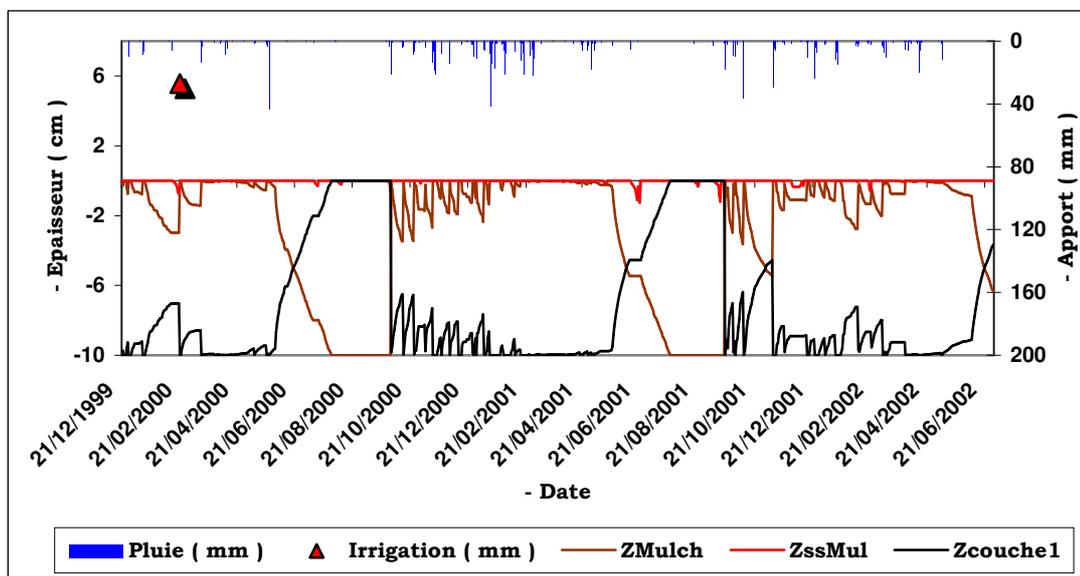


Figure 113 : Evolution comparée des épaisseurs du Mulch et de la couche superficielle du sol (Traitements Pluviaux, Période de 2000 à 2002).

Il faut tout d'abord noter que seule la couche de sol superficielle de 10 cm est prévue pour contenir le « mulch » Bilhyna. Il faut aussi noter qu'en cas d'une humidification de cette couche ne pouvant pas entraîner une suppression complète du « mulch » principal lorsqu'il est très développé, il se crée alors une zone sèche inférieure appelée « sous-mulch ».

A partir du graphique précédent, on peut apporter les remarques suivantes :

- En pleine période végétative (couverture totale), le « mulch » évolue lentement au rythme des apports et des évaporations du sol et n'atteint pratiquement pas l'épaisseur totale de la couche de sol superficielle dans la majorité des cas.

- En fin de cycle végétatif et lorsque surviennent des périodes sans apports, le « mulch » évolue brusquement pour atteindre la totalité de l'épaisseur 10 cm de la couche superficielle du sol.

- L'apparition de la zone " sous-mulch " est sporadique sauf peut être pour l'essai 2001 où il atteint une profondeur maximale de 1.3 cm.

La Figure 114 montre l'évolution de la profondeur du « mulch », de la transpiration de la plante et de l'évaporation du sol simulées par Bilhyna pour une période allant de 2000 à 2002, cas du traitement pluvial. Cette disposition graphique permet de montrer l'effet du « mulch » sur les évaporations du sol :

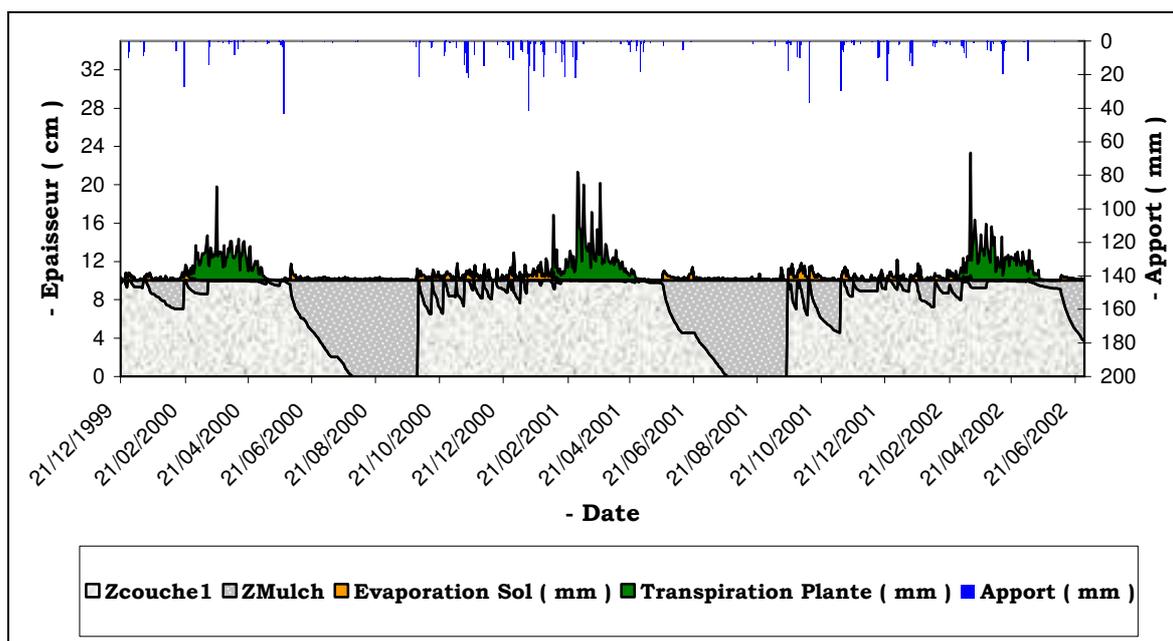


Figure 114 : Effet du Mulch sur l'évaporation du sol
(Traitements Pluviaux, de 2000 à 2002)

Le graphique montre, clairement, que le « mulch » Bilhyna limite l'évaporation du sol. En effet, en périodes hors végétation le « mulch » se propage jusqu'à atteindre toute la couche superficielle et donc limite les évaporations du sol de manière assez importante. Cette situation disparaît dès l'apparition des premières pluies d'automne et les évaporations reprennent pour disparaître ensuite en période de couverture totale par la plante.

VIII.- RENDEMENT :

Nous tentons ici une comparaison entre les rendements en grains réels et simulés seulement par Pilote.

Le graphique ci – dessous illustre la relation entre les rendements mesurés des campagnes expérimentales 2000, 2001, 2002, 2004 et 2005 (tous traitements confondus) avec les rendements simulés par le modèle de bilan hydrique « Pilote » :

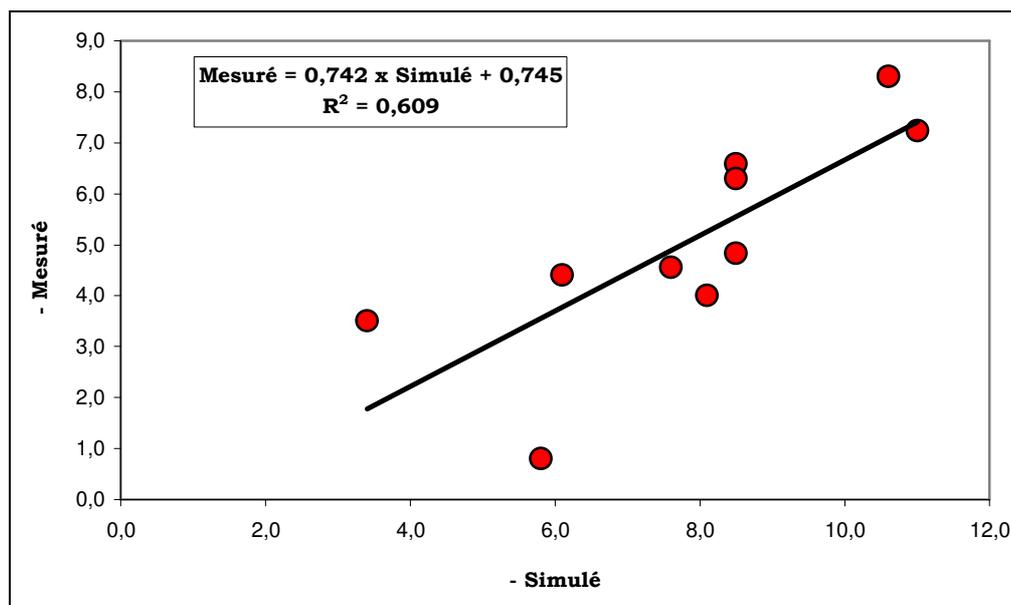


Figure 115 : Rendement en grains (T/ha) mesuré et simulé

La comparaison entre les rendements en grains simulé et mesuré, représentés sur la figure ci – dessus nous permet de constater qu’il existe une relation acceptable ($R^2 = 0.61$) entre les deux paramètres analysés (rendements mesurés et simulés par le modèle Pilote) et qui a donné lieu à l’équation suivante :

$$\text{Rdt}_{\text{mesuré}} = 0.742 \times \text{Rdt}_{\text{Pilote}} + 0.745 \quad \dots (79)$$

L’analyse statistique de cette régression confirme qu’il s’agit d’un modèle acceptable eu égard aux probabilités toutes inférieures au seuil de 5% (Annexe 10).

Conclusion Générale

Nous rappelons que l'objectif principal de notre travail consistait à utiliser les résultats des campagnes expérimentales de 2000 à 2005 effectuées sur l'irrigation du blé dur dans la Mitidja pour une mise au point des paramètres nécessaires au fonctionnement des modèles « Bilhyna » et « Pilote » afin de les rendre opérationnels pour de futurs travaux dans le même contexte.

Ces paramètres, constituant les entrées de base des modèles, portent essentiellement sur les caractéristiques du sol (Teneurs en eau à capacité au champs et point de flétrissement, densités apparentes ...) et de la plante (Indice foliaire « LAI maximal », hauteur de végétation, profondeur maximale racinaire ...). D'autres paramètres peuvent être cités et concernent les coefficients liés aux fonctions de stress hydrique et de croissance, aux cumuls des températures ...

Notons encore une fois que les calages des modèles ont porté exclusivement sur les réserves en eau du sol et le « LAI » ayant fait l'objet de mesures intensives dans les différentes campagnes expérimentales.

C'est ainsi que nos différents tests de calage ont permis d'adopter les valeurs finales des paramètres d'entrée suivants :

- *Humidité pondérale au point de flétrissement* : $H_{pf} = 0.089$
- *Humidité pondérale à capacité en champs* : $H_{cc} = 0.217$
- *Humidité pondérale à saturation* : $H_{sat} = 0.287$
- *Indice foliaire LAI maximal du blé* : $LAI_{max} = 7.0$
- *Hauteur de végétation (m)* : 0.90
- *Profondeur racinaire maximale (m)* : 1.20
- *Coefficient de contrainte hydrique (Bilhyna)* : 1.6667
- *Cumul des T°C.jour du semis à la récolte* : 2100.0
- *Coefficient d'aversion au stress hydrique (Pilote)* : 1.25

Notons que certains paramètres ont fait l'objet de mesures *in situ* mais que d'autres sont issus de la bibliographie.

A partir de ces paramètres définis comme données d'entrée, nous avons pu obtenir des calages assez acceptables :

- En ce qui concerne les réserves en eau du sol, nous pouvons retenir les résultats suivants :
 - *Les analyses des évolutions des réserves simulées ont permis de constater qu'elles restent quasi identiques plus particulièrement en pleine phase de croissance végétative puis se séparent en fin de cycle (Pilote simulant des réserves se rapprochant beaucoup plus vite vers le seuil critique de flétrissement).*
 - *Un premier test de confrontation entre les réserves simulées par les deux approches « Bilhyna » et « Pilote » a permis de conclure à une assez bonne corrélation ($R^2 = 0.915$; Proba = 0.0000; ET = 19.3).*
 - *Les relations obtenues par les calages des réserves mesurées et simulées ont été satisfaisants pour les deux modèles « Bilhyna » ($R^2 = 0.840$; Proba = 0.0000; ET = 18.9) et « Pilote » ($R^2 = 0.860$; Proba = 0.0000; ET = 21.1).*

- En ce qui concerne les indices foliaires « LAI », nous pouvons retenir les résultats suivants :
 - *Les modèles « Bilhyna » et « Pilote » permettent d'atteindre des « LAI_{max} » pratiquement aux mêmes périodes, mais présentent cependant des distorsions en phases de croissance et de décroissance.*
 - *La régression sur les « LAI » obtenus par les deux modèles a permis de conclure à une relation satisfaisante ($R^2 = 0.770$; Proba = 0.0000; ET = 0.93).*
 - *Les relations obtenues par les calages des « LAI » mesurés et simulés sont acceptables pour plus particulièrement le modèle « Bilhyna » ($R^2 = 0.814$; Proba = 0.0000; ET = 0.93) puis « Pilote » ($R^2 = 0.670$; Proba = 0.0000; ET = 1.12). Nous avons aussi constaté que les meilleurs ajustements sont obtenus pour les traitements irrigués.*

En plus de cette analyse, nous avons voulu tester les modèles dans leur approche de déterminations " *automatiques* " des irrigations, ceci dans le double but de comparer les deux stratégies d'irrigation entre elles d'abord puis avec celles réalisées effectivement dans les différentes campagnes d'essais .Cette analyse nous a permis de voir que, dans l'ensemble, les deux approches simulent le même nombre d'irrigations mais leurs définitions des doses est tout à fait différente. En ce qui concerne la comparaison avec les irrigations " *réelles* ", il faut noter qu'elles sont largement sous estimées tant de point vue " *dates* " que " *doses* ".

Nous avons aussi voulu tester les rendements en grains obtenus à travers les différents essais et ceux simulés seulement par « Pilote ». Nous avons obtenus une relation acceptable : $R^2 = 0.610$; $Proba = 0.0077$; $ET = 1.42$.

Enfin, nous pouvons conclure sur le fait que, le modèle « Bilhyna » prenant en compte beaucoup plus de facteurs et d'aspects que « Pilote », aide à mieux comprendre les phénomènes liés aux cinétiques hydriques et de croissance. Le modèle « Pilote », beaucoup plus simplifié de point de vue des paramètres d'entrée, peut servir à une utilisation dans les situations proches de nos conditions expérimentales (contraintes liés à l'indisponibilité de certaines données).

Nous suggérons enfin d'utiliser les modèles dans un cadre opérationnel de pilotage des irrigations afin de conclure à une validation à posteriori permettant de parachever les calages que nous avons réalisés.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbadi N. et al., 1997. Gestion des irrigations de complément sur la culture du blé dur (*Triticum durum* variété Vitron). Mémoire d'ingénieur, INA d'Alger.

Abib F., Haddad H., 1995. Cartographie des sols de la station expérimentale de l'Institut National Agronomique, Mémoire d'Ingénieur, INA El-Harrach, 91p.

Aidaoui A., Hartani T., 2000. Gestion de l'irrigation du blé dur par des indicateurs de l'état hydrique, INA d'Alger. L'amélioration du blé dur dans la région méditerranéenne, Options méditerranéennes Série A : Séminaire méditerranéens CIHEAM, 579-582.

Ali Allahouba Almoustapha, 2003. Suivi de la cinétique de la réserve en eau du sol (essai d'irrigation sur le blé dur : *Triticum durum* Desf, variété VITRON).

Allen R.G. et al., 1998. Crop evapotranspiration : Guide lines for computing crop water requierements, FAO Irrigation and drainage paper 56. www.dpi.qld.gov.au/fieldcrops.

Anonyme, 2003. Utilisation de l'eau en agriculture.

Anonyme, 2004. Caractéristiques de la variété "SIMETO" (blé dur), ITGC, 2p.

Aziez O., 2001. Approche morpho - physiologique de quelques céréales (blé dur Var. Vitron, et Sorgho grain Var. Argence) sous contrainte hydrique. Validation d'un modèle de bilan hydrique, Thèse de Magister INA El-Harrach, 94 p .

Baldy CH., 1972. Progrès récents concernant l'étude du système racinaire du blé dur (*Triticum sp.*) Ann. Agron. 24 (2), p. 241 – 276.

Belkacemi K., 2003. Optimisation dans la région des irrigations du blé dur (*Triticum durum* Desf) variété VITRON à travers la recherche de l'indicateur de stress le plus pertinent, Thèse de magister, 167p.

Beauchamp J., 2002. L'eau et le sol. Université de Picardie, Jules verne. http://frois.cois.bigorre.free.fr/cours_info/index.htm

Benbelkacem A., Kellou K., 2000. Evaluation des progrès génétiques chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. Var. durum) cultivées en Algérie, Unv de Constantine. L'amélioration du blé dur dans la région méditerranéenne, Options méditerranéennes Série A : Séminaire méditerranéens CIHEAM, 105-110.

BLAKE G.J., 1975. The interception process. Austral Acad. Sci., ALT Chapman and Dunin Ed., National Symposium on Hydrology, Cambera.

Bonn F., 2002. L'eau dans le système sol – plante – atmosphère. (www.INRA.fr)

Bouras FZ ., 2001. Effet du stress hydrique sur les composantes du rendements de quelques géotypes de blé dur (*Triticum durum*). Thèse Magister, INA d'El Harrach – Alger, 84p.

Brisson N., 1989. Modèle de simulation de la culture du soja et son fonctionnement hydrique. Estimation agrométéorologique des potentialités de production.

Campbell G.S., Norman J.N., 1998. An introduction to environmental biophysics. Second edition. Springer Verlag, New York, 286 p.

Carsel R.F., Parish R.S., 1988. Developing joint probability distributions of soil and water retention characteristic . Water Resour.Res. 24 : 755 – 769 .

Chol P., Tron G., 1999. Pilotage de l'irrigation.

Djab G., 2002. Essai d'irrigation de complément du blé dur variété VITRON (*Triticum durum Desf*) suivi de la cinétique de la réserve en eau du sol, mémoire d'ingénieur à l'INA d'El HARRACH, 71p.

Delli R., 2001. 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 de Magister INA El-Harrach, 104p.

Duchaufour P., 1995. Pédologie abrégée : sol, végétation, environnement, 4^{ème} édition, Masson Paris, 324p.

Erwan P., 1998. Modélisation de la variabilité spatio-temporelle du continuum sol-plante-atmosphère. Cas des couverts bistrates hétérogène et épars. Thèse de Doctorat INA Paris Grignon, 170p.

Evans R., Kassel DK., Sneed RE., 1996. Soil water, and crop characteristics important to irrigation scheduling, published by : North California Cooperative Extension Service, Publication N°AG452-L June1996 (KNS).

Filali F., 2003. Bilan hydrique à la parcelle. Pilotage d'un essai d'irrigation par le logiciel « PILOTE » dans ses versions 1.2 et 1.3 utilisant respectivement le « Kc » et le « LAI », Thèse magister, 167p.

Gate et al., 1992. La tolérance à la sécheresse, une réalité à valoriser. Perspectives agricoles 169 : p. 62 – 67.

Guyot G., 1997. Climatologie de l'environnement : de la plante aux écosystèmes, Paris (FR) Masso, 505p.

Hillel D., 1980. L'eau et le sol : Principes et processus physiques, 294p.

IMACHE A., 2001. Suivi du bilan hydrique du blé dur : Variété « Vitron », indice sur le rendement et les composantes du rendement, mémoire d'ingénieur, 85p.

ITGC, 1994. Les principales variétés de céréales cultivées en Algérie, ITGC ed., 119 p.

Itier B., Brisson N., Doussan C., Tournebize R., 1996. Bilan hydrique en agro - météorologie. édition INRA Paris, 25-29 mars 1996, Tome 2, p. 283-297.

Jacquart C., Choisnel E., 1985. Evaluation des besoins en eau du maïs : Variabilités climatique. Conf. Inter. sur les besoins en eau des cultures INRA Paris.

Katerji N., 1997. Les indicateurs de l'état hydrique de la plante. L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau, INRA édition, Paris 1997, 169-177.

Larousse Agricole, 1981.

Larousse Agricole, 2002.

Lecoeur J., 1994. Les indicateurs d'état hydrique du peuplement végétal, l'exemple du poids. In : Bulletin semence. N° 128 été 1994.

Leulmi S., 2004. Simulation du bilan hydrique à la parcelle par le modèle « Pilote » : Application à la culture de blé dur dans la Mitidja. Mémoire d'ingénieur, 103p.

Mailhol J. C., 2001. Contribution à l'amélioration des pratiques d'irrigation à la raie par une modélisation simplifiée à l'échelle de la parcelle et de la saison. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, 264p.

Mailhol J.C., Ruelle P., 1999. Un outil opérationnel pour analyser des stratégies d'irrigation du maïs au moyen d'un canon enrouleur, ICID Grenade, Q.48 – P.8, 87 – 99.

Mailhol J. C., Olufayo A, Ruelle P., 1997. Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index, Agricultural Water Management 35 (1997), 167-182.

Mailhol J. C., Revol Ph., Ruelle P., 1996. *PILOTE* : An operative Model to identify water stress occurrence dates : Application to a Sorghum crop. 16 th International Congress on Irrigation and Drainage (ICID-CIID). 47 th

International Executive Council Meeting. Workshop on Crop – water – Environment Models. Cairo International Conference Centre Cairo – Egypt, 15-22 Sept 1996, 209-222p.

Mailhol J. C., Ruelle P., 1998. PILOTE 1.3 : un modèle de simulation du LAI et du rendement adapté à l'analyse de conduites déficitaires en eau. Journées scientifique de l'INRGREF : Gestion de l'eau en conditions de pénurie 29-30 Oct. 1998 Tunisie, 1-13.

Mailhol J. C., Ruelle P., Revol P., Delage L., Lescot J. M., 1996. Operative modelling for actual evapotranspiration assesement : Calibration methodology. Cemagref, Irrigation Division. Montpellier, ASAE.

Mailhol J. C., Zairi A., Nasr A., Slatni A., Ruelle P., Ben Nouna B., 2000. Utilisation de la modélisation pour identifier les stratégies d'irrigation en intégrant la variabilité pédoclimatique, 126-135.

Mancer N., 2005. Evaluation d'essai d'irrigation de complément du blé dur variété « Simeto » par le modèle de bilan hydrique « Pilote ». Mémoire d'ingénieur, INA d'El – Harrach Alger, 69p.

Martin J. F., 2002. Le sol et l'eau. La conduite de l'irrigation basée sur des données sol – potentiel hydrique et teneur en eau du sol.

Martin J. F., 2002. Relation eau – sol. Améliorez votre irrigation grâce à la conduite de l'irrigation.

Mekaoussi H., 2004. Etude de la cinétique de surface foliaire et le potentiel hydrique foliaire, application sur le cas de blé dur (*Triticum durum*) variété Vitron sous irrigation de complément dans la Mitidja. Thèse Magister, INA d'El Harrach – Alger, 135p.

Merazka M., 2003. Dynamique de la croissance du blé dur (*Triticum durum* Desf) variété VITRON sous contrainte hydrique. Validation d'un modèle agro - météorologique, thèse de magister à l'INA, 87p.

Merrien A. et al. , 1995. Des capteurs pour demain : outils de contrôle de l'état hydrique du végétal, p.109-123.

Mokrani H., 2000. Cinétique de la surface foliaire et réserve en eau mobilisable face a une contrainte hydrique : cas du blé dur (*Triticum durum*, variété Vitron) dans la Mitidja. Mémoire d'ingénieur à l'INA d'El HARRACH, 56p.

Monteith J.L., 1965 : Evaporation and environment. Symp. Soc. Exptl. Biol., 19, 205-234.

Nemeth I. , 2001. Devenir de l'azote sous irrigation gravitaire - Application au cas d'un périmètre irrigué en Mexique. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, 260p.

Olufayo A., 1994. Caractérisation des réponses du Sorgho grain au déficit hydrique à l'aide d'indicateurs bioclimatiques. Thèse de Doctorat E.N.S.A.R de Renne, 93p.

Ouadi A., 2005. Validation des réserves minimales et maximales du sol sur une culture de blé dur dans la Mitidja. Mémoire d'ingénieur, INA d'El Harrach Alger, 79p.

Parceveaux S. (de), Catsky J., 1970 : Méthodes et techniques de mesure des surfaces foliaires. Techniques d'études des facteurs de la biosphère. INRA, 494-499.

Perrier A., 1973. Bilan hydrique de l'assolement blé - jachère et évaporation d'un sol nu en région aride. Réponse des plantes aux facteurs climatiques, UNESCO, Uppsalla (SWE), 1970/09/15-20, Paris, p.477-487.

Perrier A., 1982. Land surface processus : vegetation. In : ed. by P.SP, Eagleson, Land surface Processes in atmospheric general circulation models. World Meteorological Organization, Genève (CHE), Greenbelt (USA), 1981/01/05-10. Cambridge University Press, p.395-448.

Perrier A., 1998. Approche théorique du continuum sol - plante - atmosphère. Traité d'irrigation. L'eau et production p.112 - 146.

Perrier A., 1999. Impacts prévisibles des changements climatiques sur les ressources en eau du sol et les activités agricoles.

Polge De Combret M., 1990. Etude de la dynamique conjointe des indicateurs d'état hydrique d'une culture. Test sur une culture de Soja irriguée, mémoire de D.A.A, 72p.

Rekika D., 1996. Identification et analyse génétique des caractères physiologiques liés au rendement en condition de sécheresse chez le blé dur. Thèse Doctorat (USA).

Richards L.A., 1931 : Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics 1 : 318-333.

Ruelle P., Specty R., Deumier J. M., Itier B., Lacroix B., Pérarnaud V., Peymorte P. 1995. L'eau, la plante, le sol et le climat. La conduite de l'irrigation - de la stratégie au pilotage de l'irrigation, RNED-HA, 21-33.

Rosnoblet J., 2002. Dynamique du bilan hydrique parcellaire au sein de l'espace rural - conséquences sur les transferts hydrologiques. Doctorat, Institut National Agronomique de Paris - Grignon.

Rutter A.J., 1975 : The hydrological cycle in vegetation. « In vegetation and the Atmosphere, 1 : 111-154.

Soltner D., 1990. Les bases de la production végétale, Tome 2.

Tardieu F., Katerdji N., Bethenod O., 1990 : Relations entre l'état hydrique du sol, le potentiel de base et d'autres indicateurs de la contrainte hydrique chez le maïs. *Agronomie* 10, 617-626.

Urban L., 1997. Introduction à la production sous serre – l'irrigation fertilisante en culture hors sol, Tome 2, Paris Lavoisier, 210p.

Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892–898.

Vilain M., 1997. La production végétale. Les composantes de la production, édition Lavoisier Paris, 478p.

Zitouni Z., 2002. Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur (variété Vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja. Thèse Magister, INA d'El – Harrach Alger, 114p.

Annexes

Annexe N° 01 : DONNEES CLIMATIQUES - STATION ONM DAR EL BEIDA 1952-2004							
Année	T (°C)	HR (%)	INS(h)	Vv (m/s)	Pluie (mm)	Eto (mm)	Rg (J/cm²)
1952	18,4	58,6	7,0	3,5	630,6	1535,0	1594,2
1953	17,5	58,4	7,5	3,1	630,5	1460,6	1676,7
1954	17,3	59,6	7,7	3,1	706,1	1464,6	1719,9

1955	18,6	58,9	7,6	3,1	624,6	1487,6	1677,3
1956	16,6	58,7	7,8	3,6	679,8	1500,8	1719,6
1957	16,8	57,0	7,8	3,6	1086,7	1495,1	1718,0
1958	17,7	74,8	8,1	3,4	764,2	1339,8	1761,6
1959	17,5	75,9	7,8	3,2	802,2	1281,0	1713,0
1960	17,4	76,2	7,9	3,2	776,7	1276,1	1733,4
1961	17,9	75,6	8,5	3,0	480,9	1318,9	1828,9
1962	17,2	77,5	7,7	2,7	843,6	1213,1	1701,9
1963	17,3	77,1	7,7	3,2	648,9	1241,7	1707,0
1964	17,2	77,2	8,5	2,8	673,1	1274,2	1820,9
1965	17,3	73,7	8,1	3,0	553,9	1308,8	1770,4
1966	17,8	75,8	8,2	2,9	585,4	1267,1	1769,2
1967	17,7	73,9	7,9	3,0	763,0	1311,6	1734,4
1968	17,4	72,4	8,4	3,2	582,6	1369,2	1817,9
1969	16,9	76,3	7,1	3,5	1006,4	1247,7	1627,3
1970	17,3	70,5	7,9	3,3	722,1	1339,4	1728,9
1971	16,9	72,0	7,5	3,4	711,0	1324,8	1672,5
1972	16,4	77,4	6,9	3,6	1031,3	1176,9	1579,2
1973	16,4	77,0	7,3	3,1	1169,2	1176,1	1645,9
1974	16,4	75,6	7,8	3,1	782,5	1227,2	1712,4
1975	16,6	74,9	7,8	3,1	711,5	1243,0	1706,6
1976	16,5	76,4	7,4	3,4	761,9	1228,3	1650,8
1977	17,0	74,2	7,7	3,1	496,4	1245,8	1697,9
1978	16,5	74,4	7,7	3,2	717,5	1245,7	1697,3
1979	16,9	75,6	7,0	3,4	797,8	1230,2	1600,6
1980	16,6	75,0	7,8	3,4	729,6	1280,6	1719,5
1981	17,1	74,5	7,7	3,5	434,2	1277,9	1688,2
1982	17,3	75,0	6,9	3,4	873,2	1260,0	1570,2
1983	17,4	72,0	7,7	3,1	332,8	1304,5	1690,0
1984	16,7	74,0	7,2	3,6	884,4	1280,8	1623,5
1985	17,6	74,2	7,3	3,2	706,8	1271,3	1642,9
1986	17,6	73,5	7,6	3,4	697,1	1323,5	1681,1
1987	17,4	72,0	7,7	3,1	332,8	1295,9	1690,0
1988	16,7	74,1	7,2	3,6	884,4	1266,8	1623,5
1989	17,6	74,2	7,3	3,2	706,8	1262,6	1642,9
1990	17,5	73,8	7,6	3,4	746,4	1302,4	1683,9
1991	17,1	74,2	7,8	2,8	431,1	1250,9	1710,3
1992	17,0	77,3	7,8	2,5	755,8	1175,6	1701,5
1993	17,1	77,1	7,8	2,6	489,8	1210,9	1710,6
1994	18,3	74,7	8,5	2,6	456,8	1324,4	1817,5
1995	18,0	73,3	8,2	2,2	551,7	1256,0	1772,3
1996	17,6	71,3	7,6	2,4	801,8	1223,7	1682,4
1997	18,4	68,8	7,9	2,1	546,6	1265,4	1725,7
Année	T (°C)	HR (%)	INS(h)	Vv (m/s)	Pluie (mm)	Eto (mm)	Rg (J/cm²)
1998	17,7	69,9	8,0	1,9	609,3	1207,2	1732,8
1999	18,6	68,3	5,5	1,4	811,3	1070,4	1373,0
2000	17,8	73,0	8,4	2,8	280,9	1323,4	1791,1
2001	18,1	75,0	8,2	2,8	488,6	1315,8	1772,8

2002	18,1	71,6	7,8	2,6	475,4	1262,7	1703,0
2003	18,7	72,4	7,1	2,7	732,0	1285,8	1616,3
2004	17,6	73,5	7,4	2,3	645,5	1174,5	1641,6
Moyenne	17,4	72,4	7,7	3,0	682,0	1288,7	1694,2
Min	16,4	57,0	5,5	1,4	280,9	1070,4	1373,0
Max	18,7	77,5	8,5	3,6	1169,2	1535,0	1828,9
Ecart Type	0,6	5,4	0,5	0,5	183,5	89,5	75,7
CV (%)	3,5	7,5	6,6	15,5	26,9	6,9	4,5

Annexe N° 02 : Exemple de fichier d'entrée 'Calendrier Cultural ' Bilhyna

```

*** ----- ***
***
***
***          C A L E N D R I E R    C U L T U R A L    ***
***
***
*** ----- ***
Version SMAPOZ du 16-04-2004

```

Détermination des 2 dates extrêmes souhaitées pour cette simulation

Indications -> Entre ces deux dates, le calendrier cultural doit
renseigner l'évolution du site d'étude

Les données météo doivent être disponibles durant ce laps de temps.

DATE 1 : 21 12 1999

DATE 2 : 30 06 2002

*** ----- ***

*** - Culture n°1 - Description - ***

*** ----- ***

N° Culture dans la base de donnée : 20

NOM : Ble d'Algerie ETM 2000

VALIDITE : 21 12 1999 30 06 2000

CARACTERISTIQUES

Résistance Stomatique Minimum (s/m) : 80.0
Résistance de structure Maximum (s/m) ... : 10.0
Hauteur max de cette végétation (m) : 0.90
Profondeur max des racines (m) : 1.20
LAI Maximum : 7.0
Seuil de température (°C) : 0.0
Seuil d'échaudage (°C) : 40.0
Cumul des T°C.jour du semis à la récolte. : 2100.0 <- 1350.0
coefficient de fin de croissance (=a).... : 0.1
Température moyenne de développement : 11.0
Coef de contrainte hydrique : 1.6667
Taux de sénescence : 0.5 (0.5 à 0.7)
PAR de développement optimal : 25.0
Position de la température optimale : 0.8
Y0 de la croissance : 0.010
Y0 de la décroissance : 0.050

INTERVENTIONS

Labour : 1 22 12 1999 -6999.0 (*)
Lit de semence : 1 25 12 1999 -6999.0 (*)
Semis : 2 3 -6999.0
Récolte : 2 -6999.0 -6999.0
Travail de Surface : 0

IRRIGATIONS

Code 2 30 12 1999 20 06 2000 0.80 1.00
: 1 10
20 02 2000 27
07 03 2000 11
22 03 2000 15
29 03 2000 17
08 04 2000 26
15 04 2000 16
22 04 2000 36
30 04 2000 35
06 05 2000 29
13 05 2000 25

Annexe N° 03 : Exemple de fichier d'entrée Bilhyna : Modèle.ini

PARAMETRES LIES AU CALENDRIER CULTURAL

```

*   Nom du fichier de description du calendrier cultural :
    CalendrierPLU.txt
    Nom du fichier de description des ajustements       :
    Ajustement.txt
*   Nom du fichier contenant la Base de Donnée des cultures :
    Base.dat

```

```

-----
PARAMETRES DU SOL
-----

```

```

Description du sol en terme de couches
-----

```

```

Nombre d'horizon ..... :1
Nombre de couches par horizon ..... :12 ...
remarque -> le nombre de couche est le cumul des couches par horizon

```

```

** caractéristiques des horizons **

```

```

*****

```

```

HA -> Humidité en équilibre avec l'air .... : 0.070      ...
Hmin -> Humidité Minimum ..... : 0.089      ...
Hmax -> Humidité Maximum ..... : 0.198      ...
HC -> Humidité à la capacité au champs .... : 0.217      ...
Hsat -> Humidité à la saturation ..... : 0.287      ...
densite apparente ..... :1.567      ...
para VG alpha [m-1] ..... :1.600      ...
para VG n ..... :1.310      ...
conductivite a saturation Ks [m/s] ..... :0.0000058   ...
paraVG pour conductivite nK ..... :1.310      ...

```

```

** caractéristiques des couches **

```

```

*****

```

```

Cotes des couches ..... : 0.10 0.15 0.20 0.30
    0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00 1.20 ...
Humidités initiales de chaque couche ..... : 0.2000.205 0.208 0.210
    0.215 0.216 0.217 0.217 0.217 0.217 0.217 0.217 ...

```

```

Tortuosité du sol ..... : 1.5

```

```

-----
PARAMETRES DIVERS
-----

```

```

Nombre de jours maximum par période ..... : 5
Nom du fichier contenant tous les résultats . : .\CultureResultat.txt
Latitude du lieu géographique ..... : 0.636 radian (Alger)
    0.853 radian (Grignon)
Albédo de la surface ..... : 0.2
Coefficients de rayonnement al à a6 ..... : 0.18 0.62 0.44 0.008 0.1
    0.9
Coefficient K d'atténuation du rayonnement .. : 0.7
Diffusivité de la vapeur d'eau ..... : 2.5e-5
Masse Volumique de l'air ..... : 1.2 Kg/m3
Hauteur de mesure du vent sur parc météo .... : 2.0 m
Hauteur de mesure des températures ..... : 2.0 m(figé)
Hauteur de calcul Penman ..... : 2.0 m(figé)

```

```

-----
CONDITIONS INITIALES
-----

```

```

    Cumul des Evaporations :      0.0 mm
    Cumul des Transpirations :      0.0 mm
    Epaisseur du mulch :      0.0 m
    Epaisseur du sous-mulch :      0.0 m

```

Réserve du mulch : 0.0 mm
LAI vert : 0.0

LAI mort : 0.0

Hauteur de la plante : 0.0 m
Profondeur des racines : 0.0 m
Résistance de structure : -6999. s/m (pour forcer
le calcul) Rugosité du sol : 0.005 m
Date d'Intervention : -6999 -6999 -
6999 (plus tard) fixé à NA pour l'instant

Phase de Culture : 0 (0=sol nu; 1=croissance;
2=décroissance) fixé à 0 pour l'instant

Cumul depuis le dernier semis

Cumul des Températures : 0.0 °.jour
Cumul des ETR : 0.0 mm
Cumul des Pluies : 0.0 mm
Cumul de la période précédente

Cumul des Transpirations
Cumul des
Evaporations : 0.0 mm
Cumul des EP : 0.0 mm
Cumul des Rn : 0.0 W/m²
Cumul des Températures (Ta) : 0.0 °C
Cumul des Températures (Tr) : 0.0 °C
Cumul des Vents : 0.0 m/s

INFORMATIONS RELATIVES AU GAZON DE

REFERENCE

sol monocouche) : 0.50 m
0.08 m
: 2.5
Résistance stomatique minimum : 60.0 (AP 09-04-2004) 100.0 s/m
Résistance de structure : 3.0 à 5.0 (AP 09-04-2004) 15.0
s/m Rugosité du sol du gazon : 0.002 m
Nom du fichier résultat gazon :
.\GazonResultat.txt

Profondeur des Racines (du
Hauteur du gazon :
LAI du gazon

ORGANISATION DES

DONNEES D'ENTREES

*
Nom du fichier climatique par défaut : .\ALG5205.txt 1 0
(Nom du fichier +Nombre de lignes inutiles du fichier +codage de
la date dans ce fichier)

0 = jour mois année
1 = universel
2 = année mois jour
3 = jourAn année

MESURES NECESSAIRES

* Vent (en m/s) : 1 7
* Température de l'air sec (°C) : 1 4
* Température du point de rosée (°C) : 0

* Rayonnement net (W/m²) : 0
 * Pluie (mm) : 1 6
 * Irrigation (mm) : 0 plus maintenant (2 .\Irri.inf 1 0 4)
 * LAIvert : 0 plus maintenant (2 .\Lai.inf 1 0 4) LAImort (jamais prévu)

MESURES OPTIONNELLES

* Température de l'air sec minimum (°C) : 0
 * Température de l'air sec maximum (°C) : 0
 * Durée d'insolation (h) : 1 8
 * Rayonnement global (W/m²) : 0
 * Température du thermomètre humide (°C) : 0
 * Humidité relative de l'air [0-1] : 1 5
 * Pression de l'air à Tr (Pa) : 0
 * Rayonnement atmosphérique Rnl (W/m²) : 0
 Hauteur de la végétation (m) : 0
 Profondeur atteintes par les racines : 0

Connaissance des mesures

0 = mesure inconnue

1 = mesure connue dans le fichier climatique par défaut on y indique

- la colonne

2 = mesure connue dans un autre fichier, on y indique"

- le nom du fichier

- le nombre de lignes inutiles

- son codage de la date

- la colonne

Annexe N° 04 : Exemple de fichier de sorties Bilhyna - Cas du traitement ETM2000

DATE	Pluie	Irrigation	LAI	EPpen	ETsRe	ETpRe	ETsys	ZMulch	ZssMul	ZmulchG	Drainage	Réserve
28/12/1999	10,000	0,000	0,00000	0,897	0,29442	0,00000	0,294	0,00000	0,00000	0,00000	1,08705	402,50756
29/12/1999	6,500	0,000	0,08000	1,198	0,84713	0,00000	0,847	0,00000	0,00000	0,00000	0,99059	407,37120
30/12/1999	0,000	0,000	0,08000	1,007	0,74240	0,01644	0,759	0,00000	0,00000	0,00040	0,94837	405,83220
31/12/1999	0,000	0,000	0,08000	0,624	0,34545	0,00662	0,352	0,00150	0,00000	0,00060	0,93451	404,65822
01/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,653	0,52234	0,01269	0,535	0,00381	0,00000	0,00085	0,92481	403,26726
02/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,527	0,21061	0,00544	0,216	0,00474	0,00000	0,00095	0,91942	402,17651
03/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,544	0,36989	0,00905	0,379	0,00641	0,00000	0,00117	0,91749	400,91309
04/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,048	0,00000	0,00000	0,000	0,00641	0,00000	0,00130	0,91754	400,03197
05/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,026	0,00000	0,00000	0,000	0,00641	0,00000	0,00140	0,91821	399,15861
06/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,028	0,00000	0,00000	0,000	0,00641	0,00000	0,00150	0,91857	398,29750
07/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,048	0,00000	0,00000	0,000	0,00641	0,00000	0,00161	0,91803	397,45164
08/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,282	0,10584	0,00484	0,111	0,00690	0,00000	0,00181	0,91629	396,51393
09/01/2000	0,200	0,000	0,08000	0,605	0,21107	0,00595	0,217	0,00698	0,00000	0,00200	0,91322	395,68081
10/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,240	0,07701	0,00305	0,080	0,00734	0,00000	0,00200	0,90883	394,81047
11/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,263	0,09559	0,00381	0,099	0,00779	0,00000	0,00200	0,90321	393,93988
12/01/2000	8,800	0,000	0,08000	0,338	0,10223	0,00151	0,104	0,00000	0,00000	0,00000	0,97199	401,79326
13/01/2000	6,500	0,000	0,08000	0,498	0,44264	0,00171	0,444	0,00000	0,00000	0,00000	0,96208	407,01291
14/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,159	0,00000	0,00000	0,000	0,00000	0,00000	0,00020	0,88100	406,25090
15/01/2000	0,000	0,000	0,08000	1,034	0,67507	0,01359	0,689	0,00226	0,00000	0,00054	0,87278	404,75388
16/01/2000	0,000	0,000	0,08000	1,275	0,61820	0,01643	0,635	0,00498	0,00000	0,00086	0,86733	403,27242
17/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,788	0,38951	0,01097	0,400	0,00672	0,00000	0,00113	0,86560	402,00053
18/01/2000	0,000	0,000	0,08000	1,317	0,82400	0,02038	0,844	0,01042	0,00000	0,00167	0,86702	400,26536
19/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,956	0,47726	0,01974	0,497	0,01258	0,00000	0,00210	0,87030	398,89155
20/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,581	0,21328	0,00794	0,221	0,01355	0,00000	0,00240	0,87414	397,79499
21/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,244	0,00395	0,00000	0,004	0,01357	0,00000	0,00254	0,87757	396,92613
22/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,373	0,11460	0,00351	0,118	0,01409	0,00000	0,00276	0,87997	395,95721
23/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,671	0,20774	0,00434	0,212	0,01506	0,00000	0,00297	0,88100	394,90808

DATE	Pluie	Irrigation	LAI	EPpen	ETsRe	ETpRe	ETsys	ZMulch	ZssMul	ZmulchG	Drainage	Réserve
24/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,718	0,30537	0,01800	0,323	0,01647	0,00000	0,00327	0,88054	393,77326
25/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,366	0,05363	0,00246	0,056	0,01672	0,00000	0,00341	0,87856	392,92128
26/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,385	0,05780	0,00209	0,060	0,01699	0,00000	0,00356	0,87516	392,08427
27/01/2000	0,000	0,000	0,08000	0,404	0,06950	0,00192	0,071	0,01732	0,00000	0,00373	0,87044	391,25422
28/01/2000	0,000	0,000	0,08000	1,479	0,39509	0,00818	0,403	0,01918	0,00000	0,00408	0,86456	390,09966
29/01/2000	0,000	0,000	0,08094	0,674	0,12238	0,00876	0,131	0,01976	0,00000	0,00428	0,85765	389,20271
30/01/2000	0,000	0,000	0,08179	0,623	0,16937	0,01121	0,181	0,02056	0,00000	0,00452	0,84988	388,31027
31/01/2000	0,000	0,000	0,08272	0,552	0,04761	0,00333	0,051	0,02079	0,00000	0,00467	0,84138	387,57274
01/02/2000	0,000	0,000	0,08387	0,637	0,06437	0,00373	0,068	0,02110	0,00000	0,00484	0,83228	386,83330
02/02/2000	0,000	0,000	0,08540	1,464	0,45412	0,00996	0,464	0,02327	0,00000	0,00528	0,82270	385,66895
03/02/2000	0,000	0,000	0,08717	1,338	0,43511	0,00000	0,435	0,02535	0,00000	0,00559	0,81274	384,68806
04/02/2000	0,000	0,000	0,08726	0,547	0,07311	0,00000	0,073	0,02570	0,00000	0,00572	0,80249	384,00489
05/02/2000	0,000	0,000	0,08734	0,578	0,09193	0,00916	0,101	0,02614	0,00000	0,00586	0,79204	383,31971
06/02/2000	0,000	0,000	0,08744	0,768	0,10327	0,01063	0,114	0,02664	0,00000	0,00600	0,78145	382,63834
07/02/2000	0,000	0,000	0,08757	1,200	0,31994	0,03377	0,354	0,02819	0,00000	0,00627	0,77078	381,77934
08/02/2000	0,000	0,000	0,08773	0,733	0,09891	0,00946	0,108	0,02867	0,00000	0,00000	0,76009	381,11635
09/02/2000	0,200	0,000	0,08801	1,285	0,09537	0,01170	0,107	0,02867	0,00000	0,00000	0,74940	380,44438
10/02/2000	0,000	0,000	0,09841	0,995	0,09654	0,01763	0,114	0,02867	0,00000	0,00083	0,73876	379,73597
11/02/2000	0,000	0,000	0,10920	0,898	0,08166	0,01004	0,092	0,02907	0,00000	0,00129	0,72820	379,11178
12/02/2000	5,800	0,000	0,12089	0,828	0,09315	0,00749	0,101	0,02907	0,00000	0,00000	0,71774	384,26787
13/02/2000	0,000	0,000	0,17178	0,909	0,08166	0,01654	0,098	0,02907	0,00036	0,00078	0,70739	383,66105
14/02/2000	0,000	0,000	0,22863	1,147	0,14172	0,03088	0,173	0,02907	0,00097	0,00133	0,69717	382,99035
15/02/2000	0,000	0,000	0,28909	0,946	0,08313	0,01721	0,100	0,02907	0,00133	0,00182	0,68710	382,40206
16/02/2000	0,000	0,000	0,37005	1,743	0,20722	0,04737	0,255	0,02907	0,00223	0,00249	0,67719	381,66775
17/02/2000	0,000	0,000	0,46524	2,650	0,38568	0,09320	0,479	0,02907	0,00391	0,00000	0,66745	380,71555
18/02/2000	0,000	0,000	0,57052	2,135	0,54111	0,43277	0,974	0,02907	0,00625	0,00117	0,65788	379,35190
19/02/2000	0,000	0,000	0,68467	1,819	0,30998	0,29543	0,605	0,02907	0,00760	0,00180	0,64847	378,35706
20/02/2000	0,000	27,000	0,79704	2,006	0,34195	0,31543	0,657	0,00000	0,00000	0,00240	0,97064	404,07432

DATE	Pluie	Irrigation	LAI	EPpen	ETsRe	ETpRe	ETsys	ZMulch	ZssMul	ZmulchG	Drainage	Réserve
21/02/2000	0,000	0,000	0,90168	2,078	0,90157	0,89355	1,795	0,00000	0,00000	0,00283	0,63297	401,93133
22/02/2000	0,000	0,000	1,01661	2,071	0,80978	0,76739	1,577	0,00217	0,00000	0,00000	0,62223	399,92415
23/02/2000	0,000	0,000	1,16575	1,988	0,50011	0,74190	1,242	0,00438	0,00000	0,00104	0,61535	398,22532
24/02/2000	0,000	0,000	1,29320	1,994	0,39203	0,67182	1,064	0,00615	0,00000	0,00186	0,61241	396,65211
25/02/2000	0,000	0,000	1,42736	1,906	0,28081	0,45606	0,737	0,00743	0,00000	0,00249	0,61349	395,33053
26/02/2000	0,000	0,000	1,59045	2,000	0,16786	1,43909	1,607	0,00821	0,00000	0,00317	0,61767	393,33028
27/02/2000	0,000	0,000	1,77540	1,582	0,10905	0,70724	0,816	0,00872	0,00000	0,00368	0,62361	391,97375
28/02/2000	0,000	0,000	1,97881	1,946	0,19099	1,74172	1,933	0,00964	0,00000	0,00000	0,63007	389,70557
29/02/2000	0,000	0,000	2,20523	1,417	0,10405	0,81261	0,917	0,01014	0,00000	0,00076	0,63602	388,28608
01/03/2000	0,000	0,000	2,45776	2,058	0,16885	1,53030	1,699	0,01097	0,00000	0,00161	0,64082	386,24501
02/03/2000	0,000	0,000	2,69812	2,946	0,02874	4,26886	4,298	0,01112	0,00000	0,00250	0,64406	381,94248
03/03/2000	0,000	0,000	2,92523	2,610	0,01934	2,65269	2,672	0,01122	0,00000	0,00305	0,64537	379,09290
04/03/2000	0,000	0,000	3,18133	2,785	0,02420	3,30664	3,331	0,01135	0,00000	0,00000	0,64438	375,63012
05/03/2000	0,000	0,000	3,41555	2,011	0,01604	1,66630	1,682	0,01144	0,00000	0,00111	0,64085	373,53412
06/03/2000	0,000	0,000	3,65600	2,114	0,01689	1,72621	1,743	0,01153	0,00000	0,00191	0,63488	371,45436
07/03/2000	0,000	0,000	3,89926	2,097	0,00489	2,02380	2,029	0,01156	0,00000	0,00251	0,62679	379,70507
08/03/2000	0,000	0,000	4,13670	2,122	0,00552	2,99082	2,996	0,01159	0,00000	0,00307	0,61692	376,16216
09/03/2000	0,000	0,000	4,34919	2,513	0,00591	2,80261	2,809	0,01162	0,00000	0,00000	0,60550	372,60252
10/03/2000	0,000	0,000	4,58160	2,864	0,00626	2,92638	2,933	0,01166	0,00000	0,00135	0,59276	368,82596
11/03/2000	0,000	0,000	4,85276	3,163	0,00693	2,97218	2,979	0,01170	0,00000	0,00238	0,57895	365,06147
12/03/2000	0,000	0,000	5,10888	3,402	0,00112	3,80247	3,804	0,01171	0,00000	0,00318	0,56429	361,16202
13/03/2000	0,500	0,000	5,34852	3,111	0,00135	4,67185	4,673	0,01171	0,00000	0,00000	0,54878	356,65561
14/03/2000	13,900	0,000	5,52305	2,019	0,00031	1,58077	1,581	0,00000	0,00000	0,00000	0,62703	367,19574
15/03/2000	3,700	0,000	5,69434	2,074	0,02364	1,43602	1,460	0,00010	0,00000	0,00000	0,52370	367,99757
16/03/2000	0,000	0,000	5,85070	2,618	0,01644	3,39876	3,415	0,00019	0,00000	0,00116	0,49948	364,08570
17/03/2000	0,000	0,000	5,98489	2,921	0,01239	2,99028	3,003	0,00025	0,00000	0,00192	0,48244	360,69422
18/03/2000	0,000	0,000	6,09982	2,689	0,00999	2,40593	2,416	0,00031	0,00000	0,00253	0,46592	357,98100
19/03/2000	0,000	0,000	6,20433	2,719	0,00947	2,72982	2,739	0,00036	0,00000	0,00307	0,44983	354,93019

DATE	Pluie	Irrigation	LAI	EPpen	ETsRe	ETpRe	ETsys	ZMulch	ZssMul	ZmulchG	Drainage	Réserve
20/03/2000	0,000	0,000	6,29585	2,857	0,00891	2,58925	2,598	0,00041	0,00000	0,00359	0,43422	352,06310
21/03/2000	0,000	0,000	6,39565	3,267	0,00294	3,62109	3,624	0,00043	0,00000	0,00403	0,41913	347,99767
22/03/2000	0,000	0,000	6,52681	6,233	0,00582	9,60363	9,609	0,00047	0,00000	0,00472	0,40451	351,44177
23/03/2000	0,100	0,000	6,61331	2,797	0,00265	2,58249	2,585	0,00047	0,00000	0,00000	0,39008	346,66875
24/03/2000	0,100	0,000	6,66427	3,317	0,00164	3,02417	3,026	0,00047	0,00000	0,00145	0,37590	343,00586
25/03/2000	0,000	0,000	6,70141	3,111	0,00138	2,86443	2,866	0,00047	0,00001	0,00192	0,36214	339,56330
26/03/2000	0,000	0,000	6,73175	3,272	0,00150	3,05779	3,059	0,00047	0,00001	0,00266	0,34888	335,94404
27/03/2000	0,000	0,000	6,76071	3,583	0,00080	2,61089	2,612	0,00047	0,00000	0,00000	0,33617	332,87380
28/03/2000	1,100	40,000	6,78483	1,979	0,00089	1,01986	1,021	0,00000	0,00000	0,00000	1,23077	331,54873
29/03/2000	0,000	0,000	6,81641	3,732	0,01729	5,21623	5,234	0,00000	0,00000	0,00163	0,31794	343,29741
30/03/2000	0,000	0,000	6,84479	2,599	0,01239	2,19523	2,208	0,00006	0,00000	0,00234	0,30301	340,87741
31/03/2000	0,000	0,000	6,87165	2,786	0,00884	3,31264	3,321	0,00010	0,00000	0,00301	0,29153	337,43972
01/04/2000	0,000	0,000	6,89348	3,638	0,00838	3,46396	3,472	0,00014	0,00000	0,00000	0,28119	333,87022
02/04/2000	0,100	0,000	6,89348	3,928	0,00795	4,69450	4,702	0,00017	0,00000	0,00152	0,27151	329,08773
03/04/2000	1,900	0,000	6,91003	4,474	0,00287	4,20133	4,204	0,00002	0,00000	0,00000	0,26249	325,84181
04/04/2000	0,500	0,000	6,92141	4,828	0,00882	5,84605	5,855	0,00005	0,00000	0,00000	0,25360	320,42117
05/04/2000	0,100	0,000	6,93004	5,428	0,00508	5,86313	5,868	0,00006	0,00000	0,00133	0,24522	314,99887
06/04/2000	0,000	0,000	6,93607	3,932	0,00507	3,78292	3,788	0,00010	0,00000	0,00182	0,23717	311,43515
07/04/2000	0,000	0,000	6,94222	3,667	0,00410	3,31583	3,320	0,00012	0,00000	0,00000	0,22943	308,34639
08/04/2000	8,300	0,000	6,94222	3,208	0,00352	3,18208	3,186	0,00002	0,00000	0,00000	0,23758	337,04953
09/04/2000	0,000	0,000	6,92502	4,290	0,01052	3,66789	3,678	0,00008	0,00000	0,00156	0,21543	332,65346
10/04/2000	0,200	0,000	6,90486	4,612	0,00752	4,85078	4,858	0,00008	0,00000	0,00252	0,20829	326,92634
11/04/2000	4,700	0,000	6,88151	4,482	0,00339	4,15582	4,159	0,00002	0,00000	0,00000	0,20412	325,02271
12/04/2000	0,000	0,000	6,85212	5,371	0,01418	5,78709	5,801	0,00011	0,00000	0,00204	0,19563	318,20380
13/04/2000	0,000	0,000	6,82065	2,756	0,00372	1,49478	1,499	0,00013	0,00000	0,00000	0,18955	316,50415
14/04/2000	0,000	0,000	6,77228	4,852	0,00607	3,80467	3,811	0,00017	0,00000	0,00166	0,18375	312,10741
15/04/2000	0,000	0,000	6,71088	5,128	0,00542	3,43934	3,445	0,00021	0,00000	0,00266	0,17820	322,88148
16/04/2000	0,700	0,000	6,60492	6,781	0,00687	5,19980	5,207	0,00005	0,00000	0,00000	0,17287	314,27543

DATE	Pluie	Irrigation	LAI	EPpen	ETsRe	ETpRe	ETsys	ZMulch	ZssMul	ZmulchG	Drainage	Réserve
17/04/2000	0,000	0,000	6,49908	4,730	0,00999	5,53161	5,542	0,00013	0,00000	0,00182	0,16774	307,23859
18/04/2000	0,000	0,000	6,37461	5,628	0,00670	4,06354	4,070	0,00019	0,00000	0,00000	0,16279	302,13248
19/04/2000	0,000	0,000	6,20477	4,586	0,00486	3,35523	3,360	0,00023	0,00000	0,00181	0,15799	297,98264
20/04/2000	0,000	0,000	5,98082	5,708	0,00443	2,62358	2,628	0,00027	0,00000	0,00000	0,15335	294,78020
21/04/2000	0,000	0,000	5,71577	4,966	0,00305	1,40988	1,413	0,00029	0,00000	0,00201	0,14886	293,12007
22/04/2000	0,000	0,000	5,35581	5,988	0,00547	4,62255	4,628	0,00035	0,00000	0,00000	0,14455	321,79385
23/04/2000	0,000	0,000	4,96427	6,078	0,00592	4,83751	4,843	0,00041	0,00000	0,00227	0,14040	312,17887
24/04/2000	0,000	0,000	4,60999	4,556	0,00334	1,50170	1,505	0,00044	0,00000	0,00000	0,13639	309,18003
25/04/2000	0,000	0,000	4,16317	4,369	0,00294	1,47959	1,483	0,00047	0,00000	0,00171	0,13252	306,51814
26/04/2000	0,000	0,000	3,64868	4,516	0,00320	1,83764	1,841	0,00050	0,00000	0,00278	0,12879	303,22026
27/04/2000	0,000	0,000	3,12717	4,834	0,00445	2,83763	2,842	0,00055	0,00000	0,00000	0,12521	298,86175
28/04/2000	0,400	0,000	2,71880	5,903	0,00539	3,22814	3,234	0,00055	0,00000	0,00000	0,12177	293,27032
29/04/2000	0,000	0,000	2,32024	4,889	0,01341	2,62123	2,635	0,00055	0,00006	0,00000	0,11846	289,10825
30/04/2000	0,000	0,000	1,82120	6,035	0,00953	3,26242	3,272	0,00055	0,00000	0,00220	0,11526	317,03095
01/05/2000	0,000	0,000	1,45272	3,836	0,00905	1,12948	1,139	0,00067	0,00000	0,00000	0,11217	313,22041
02/05/2000	0,000	0,000	1,12068	4,035	0,00847	1,04538	1,054	0,00078	0,00000	0,00175	0,10919	310,29411
03/05/2000	0,000	0,000	0,78440	6,387	0,01311	2,24608	2,259	0,00095	0,00000	0,00319	0,10632	304,31858
04/05/2000	0,000	0,000	0,50910	8,736	0,04490	2,90000	2,945	0,00157	0,00000	0,00000	0,10356	294,71234
05/05/2000	0,000	0,000	0,36495	4,870	0,01981	0,90599	0,926	0,00184	0,00000	0,00202	0,10090	293,13523
06/05/2000	0,000	0,000	0,27000	4,995	0,02002	1,07795	1,098	0,00213	0,00000	0,00000	0,09833	317,66241
07/05/2000	0,000	0,000	0,19529	4,066	0,01376	0,50677	0,521	0,00232	0,00000	0,00189	0,09585	315,72418
08/05/2000	0,000	0,000	0,14173	4,005	0,01359	0,61572	0,629	0,00252	0,00000	0,00300	0,09347	313,73577
09/05/2000	1,900	0,000	0,09947	2,338	0,00731	0,14604	0,153	0,00009	0,00000	0,00000	0,09118	313,37381
10/05/2000	1,100	0,000	0,07098	2,721	0,07834	0,11588	0,194	0,00094	0,00000	0,00000	0,08899	312,90225
11/05/2000	0,000	0,000	0,05182	4,699	0,04650	0,14580	0,192	0,00151	0,00000	0,00219	0,08688	311,78362
12/05/2000	0,000	0,000	0,03627	4,213	0,03685	0,12195	0,159	0,00195	0,00000	0,00339	0,08486	310,90979
13/05/2000	0,000	0,000	0,02486	4,085	0,03487	0,15128	0,186	0,00238	0,00000	0,00000	0,08292	333,11037
14/05/2000	0,000	0,000	0,01734	3,313	0,02222	0,07934	0,102	0,00265	0,00000	0,00186	0,08106	332,45389

DATE	Pluie	Irrigation	LAI	EPpen	ETsRe	ETpRe	ETsys	ZMulch	ZssMul	ZmulchG	Drainage	Réserve
15/05/2000	0,000	0,000	0,01187	5,016	0,03422	0,14344	0,178	0,00307	0,00000	0,00366	0,07928	331,38056
16/05/2000	0,000	0,000	0,00822	4,061	0,02082	0,02564	0,046	0,00333	0,00000	0,00000	0,07757	330,70419
17/05/2000	0,000	0,000	0,00567	3,976	0,02067	0,02933	0,050	0,00359	0,00000	0,00225	0,07593	329,98609
18/05/2000	0,000	0,000	0,00384	3,721	0,01711	0,01946	0,037	0,00380	0,00000	0,00357	0,07435	329,52212
19/05/2000	0,000	0,000	0,00268	4,257	0,02011	0,02587	0,046	0,00405	0,00000	0,00000	0,07284	329,28959
20/05/2000	0,100	0,000	0,00183	3,878	0,01770	0,02328	0,041	0,00405	0,00000	0,00219	0,07139	329,10725
21/05/2000	0,700	0,000	0,00125	1,701	0,00563	0,00143	0,007	0,00405	0,00000	0,00000	0,06999	329,33441
22/05/2000	2,000	0,000	0,00085	3,104	0,00894	0,00182	0,011	0,00010	0,00000	0,00000	0,06865	330,46110
23/05/2000	3,600	0,000	0,00059	2,613	0,07860	0,00070	0,079	0,00066	0,00000	0,00000	0,06754	333,12884
24/05/2000	0,700	0,000	0,00040	2,349	0,03903	0,00053	0,040	0,00033	0,00000	0,00000	0,06626	333,29520
25/05/2000	43,300	0,000	0,00029	1,851	0,06301	0,00030	0,063	0,00000	0,00000	0,00000	1,09365	375,36412
26/05/2000	0,000	0,000	0,00021	4,951	0,21970	0,00142	0,221	0,00096	0,00000	0,00204	0,08447	375,04635
27/05/2000	0,000	0,000	0,00016	4,730	0,11131	0,00116	0,112	0,00148	0,00000	0,00322	0,07128	374,74982
28/05/2000	0,000	0,000	0,00011	4,727	0,08737	0,00114	0,089	0,00191	0,00000	0,00417	0,06419	374,44840
29/05/2000	0,000	0,000	0,00008	6,055	0,09685	0,00186	0,099	0,00241	0,00000	0,00522	0,06216	374,06710
30/05/2000	0,000	0,000	0,00000	5,617	0,07703	0,00141	0,078	0,00281	0,00000	0,00614	0,06093	373,83135
31/05/2000	0,000	0,000	0,00000	5,475	0,05053	0,00000	0,051	0,00308	0,00000	0,00698	0,05962	373,64432
01/06/2000	0,000	0,000	0,00000	6,194	1,84459	0,00000	1,845	0,01323	0,00000	0,00787	0,05833	371,42826
02/06/2000	0,000	0,000	0,00000	5,008	0,89125	0,00000	0,891	0,01822	0,00000	0,00000	0,05716	370,33446
03/06/2000	0,000	0,000	0,00000	4,980	0,69872	0,00000	0,699	0,02220	0,00000	0,00229	0,05612	369,44320
04/06/2000	0,000	0,000	0,00000	4,681	0,55453	0,00000	0,555	0,02540	0,00000	0,00356	0,05518	368,69780
05/06/2000	0,000	0,000	0,00000	5,234	0,66611	0,00000	0,666	0,02930	0,00000	0,00000	0,05430	367,81645
06/06/2000	0,000	0,000	0,00000	4,538	0,25554	0,00000	0,256	0,03081	0,00000	0,00200	0,05344	367,31678
07/06/2000	0,000	0,000	0,00000	6,076	0,32670	0,00000	0,327	0,03277	0,00000	0,00000	0,05262	366,71754
08/06/2000	0,000	0,000	0,00000	5,804	0,29343	0,00000	0,293	0,03454	0,00000	0,00231	0,05182	366,15590
09/06/2000	0,000	0,000	0,00000	4,165	0,17876	0,00000	0,179	0,03563	0,00000	0,00000	0,05105	365,73331

N° 05 : Fichiers d'entrée modèle Pilote

1.- Fichier " Paramètres d'initialisation "

Nom initialisation	Blé Vitron ETM2000	
Date début simulation		21/12/1999
Date fin simulation		10/06/2000
Capacité au champ		0,34
Point de fletrissement		0,14
Coef réduc évapo sol (effet mulch)		0,00
Stock hydrique au début de la simulation		400,00
Jour de semis		28/12
Date récolte butoire		26/05

2.- Fichier " Paramètres plante "

Nom plante		Blé Vitron ETM2000	
Profondeur racinaire maximale en m	1,20	<input checked="" type="checkbox"/> Impact du stress hydrique sur l'indice de récolte	
Rfu / Ru	0,60	Seuil du L.A.I pour stress hydrique	5,00
Accroissement racinaire [m/]	0,0080	coeff de décroissance de l'indice de récolte	0,20
Durée d'installation du système racinaire	30,00	Seuil debut phase critique [en t*]	900,00
coefficient cultural maximum	1,20	Fin de phase critique [en t*]	1 500,00
Coefficient maximal d'évaporation	0,20	Temp floraison (ou temp -> LAI max)	1 000,00
Coef d'aversion au stress hydrique	1,25	Température de maturité	2 100,00
Densité plante réelle	250,00	Température d'émergence	80,00
Densité plante optimale	280,00	Température de base	0,00
Humidité grain (en %)	10,00	LAI max	7,00
Efficienc de conversion	1,10	Coef forme LAI alpha	29,80
Indice de récolte potentiel	0,52	Coef forme LAI beta	3,50
		Coef forme LAI gamma	1,70

Annexe N° 06 : Exemple de fichier de sorties Pilote - Cas du traitement ETM 2000

DATE	Pluie	Irrigation	LAI	ETP	ET Sol	Transp.Plante	ETR	Drainage	Réserve
28/12/1999	10,00	0,00	0,00	0,80	0,80	0,00	0,80	0,00	405,00
29/12/1999	6,50	0,00	0,00	1,20	1,20	0,00	1,20	2,30	408,00
30/12/1999	0,00	0,00	0,00	0,80	0,80	0,00	0,80	0,00	407,00
31/12/1999	0,00	0,00	0,00	0,60	0,60	0,00	0,60	0,00	407,00
01/01/2000	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00	406,00
02/01/2000	0,00	0,00	0,00	0,30	0,30	0,00	0,30	0,00	406,00
03/01/2000	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00	405,00
04/01/2000	0,00	0,00	0,00	0,40	0,40	0,00	0,40	0,00	405,00
05/01/2000	0,00	0,00	0,00	0,40	0,40	0,00	0,40	0,00	405,00
06/01/2000	0,00	0,00	0,00	0,30	0,30	0,00	0,30	0,00	404,00
07/01/2000	0,00	0,00	0,00	0,40	0,40	0,00	0,40	0,00	404,00
08/01/2000	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00	403,00
09/01/2000	0,20	0,00	0,00	0,60	0,60	0,00	0,60	0,00	403,00
10/01/2000	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00	402,00
11/01/2000	0,00	0,00	0,01	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00	402,00
12/01/2000	8,80	0,00	0,02	0,60	0,60	0,00	0,60	2,10	408,00
13/01/2000	6,50	0,00	0,02	0,70	0,70	0,00	0,70	5,80	408,00
14/01/2000	0,00	0,00	0,04	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00	408,00
15/01/2000	0,00	0,00	0,05	0,80	0,80	0,00	0,80	0,00	407,00
16/01/2000	0,00	0,00	0,07	0,90	0,90	0,00	0,90	0,00	406,00
17/01/2000	0,00	0,00	0,09	0,60	0,60	0,00	0,60	0,00	405,00
18/01/2000	0,00	0,00	0,11	1,20	1,10	0,00	1,10	0,00	404,00
19/01/2000	0,00	0,00	0,13	1,10	1,00	0,00	1,00	0,00	403,00
20/01/2000	0,00	0,00	0,16	0,90	0,80	0,00	0,80	0,00	402,00
21/01/2000	0,00	0,00	0,19	0,60	0,50	0,00	0,50	0,00	402,00
22/01/2000	0,00	0,00	0,21	0,70	0,60	0,00	0,60	0,00	401,00
23/01/2000	0,00	0,00	0,23	0,70	0,60	0,00	0,60	0,00	401,00
24/01/2000	0,00	0,00	0,26	1,00	0,80	0,00	0,90	0,00	400,00
25/01/2000	0,00	0,00	0,29	0,70	0,60	0,00	0,60	0,00	399,00
26/01/2000	0,00	0,00	0,32	0,70	0,60	0,00	0,60	0,00	398,00
27/01/2000	0,00	0,00	0,35	0,80	0,60	0,10	0,70	0,00	398,00
28/01/2000	0,00	0,00	0,41	1,60	1,20	0,20	1,40	0,00	396,00
29/01/2000	0,00	0,00	0,45	0,90	0,70	0,10	0,80	0,00	396,00
30/01/2000	0,00	0,00	0,49	1,10	0,80	0,10	0,90	0,00	395,00
31/01/2000	0,00	0,00	0,53	1,00	0,70	0,20	0,80	0,00	394,00
01/02/2000	0,00	0,00	0,58	1,00	0,70	0,20	0,80	0,00	393,00
02/02/2000	0,00	0,00	0,64	1,80	1,10	0,40	1,50	0,00	391,00
03/02/2000	0,00	0,00	0,71	1,60	1,00	0,40	1,40	0,00	390,00
04/02/2000	0,00	0,00	0,75	1,00	0,60	0,30	0,90	0,00	389,00
05/02/2000	0,00	0,00	0,80	1,00	0,60	0,30	0,90	0,00	388,00
06/02/2000	0,00	0,00	0,85	1,10	0,30	0,50	0,60	0,00	388,00
07/02/2000	0,00	0,00	0,91	1,60	0,00	1,10	1,10	0,00	387,00
08/02/2000	0,00	0,00	0,97	1,20	0,00	0,90	0,90	0,00	386,00
09/02/2000	0,20	0,00	1,04	1,60	0,10	1,00	0,70	0,00	385,00
10/02/2000	0,00	0,00	1,10	1,50	0,00	1,20	1,20	0,00	383,00
11/02/2000	0,00	0,00	1,16	1,30	0,00	1,10	1,10	0,00	382,00

12/02/2000	5,80	0,00	1,22	1,20	0,50	0,60	1,10	0,00	387,00
13/02/2000	0,00	0,00	1,29	1,40	0,60	0,70	1,30	0,00	386,00
14/02/2000	0,00	0,00	1,37	1,40	0,50	0,80	1,30	0,00	384,00
15/02/2000	0,00	0,00	1,45	1,50	0,50	0,90	1,40	0,00	383,00
16/02/2000	0,00	0,00	1,54	2,20	0,30	1,80	1,60	0,00	381,00
17/02/2000	0,00	0,00	1,63	2,80	0,00	2,70	2,70	0,00	378,00
18/02/2000	0,00	0,00	1,74	2,30	0,00	2,30	2,30	0,00	376,00
19/02/2000	0,00	0,00	1,84	2,20	0,00	2,20	2,20	0,00	374,00
20/02/2000	0,00	27,00	1,94	2,20	0,60	1,70	2,20	0,00	399,00
21/02/2000	0,00	0,00	2,01	2,00	0,50	1,60	2,10	0,00	397,00
22/02/2000	0,00	0,00	2,09	1,80	0,40	1,50	1,90	0,00	395,00
23/02/2000	0,00	0,00	2,19	1,60	0,30	1,30	1,70	0,00	393,00
24/02/2000	0,00	0,00	2,27	1,60	0,30	1,40	1,70	0,00	391,00
25/02/2000	0,00	0,00	2,34	1,70	0,30	1,50	1,80	0,00	389,00
26/02/2000	0,00	0,00	2,43	2,00	0,40	1,80	2,20	0,00	387,00
27/02/2000	0,00	0,00	2,53	1,60	0,30	1,50	1,70	0,00	386,00
28/02/2000	0,00	0,00	2,64	2,00	0,30	1,90	2,20	0,00	383,00
29/02/2000	0,00	0,00	2,75	1,50	0,20	1,40	1,70	0,00	382,00
01/03/2000	0,00	0,00	2,87	2,20	0,30	2,20	2,50	0,00	379,00
02/03/2000	0,00	0,00	2,98	2,60	0,00	3,20	2,70	0,00	376,00
03/03/2000	0,00	0,00	3,08	2,40	0,00	2,70	2,70	0,00	373,00
04/03/2000	0,00	0,00	3,19	2,50	0,00	2,90	2,90	0,00	370,00
05/03/2000	0,00	0,00	3,30	1,90	0,00	2,20	2,20	0,00	368,00
06/03/2000	0,00	0,00	3,41	2,10	0,00	2,40	2,40	0,00	366,00
07/03/2000	0,00	11,00	3,53	1,90	0,20	2,00	2,20	0,00	375,00
08/03/2000	0,00	0,00	3,65	2,00	0,20	2,20	2,30	0,00	372,00
09/03/2000	0,00	0,00	3,77	2,30	0,20	2,50	2,70	0,00	370,00
10/03/2000	0,00	0,00	3,89	2,60	0,20	2,90	3,00	0,00	367,00
11/03/2000	0,00	0,00	4,05	2,90	0,00	3,90	3,30	0,00	363,00
12/03/2000	0,00	0,00	4,22	2,80	0,00	3,30	3,30	0,00	359,00
13/03/2000	0,50	0,00	4,41	2,90	0,00	4,00	3,30	0,00	356,00
14/03/2000	13,90	0,00	4,56	1,80	0,10	2,00	2,10	0,00	368,00
15/03/2000	3,70	0,00	4,71	2,10	0,10	2,40	2,50	0,00	369,00
16/03/2000	0,00	0,00	4,86	2,60	0,10	3,00	3,10	0,00	366,00
17/03/2000	0,00	0,00	5,00	2,60	0,10	3,00	3,10	0,00	363,00
18/03/2000	0,00	0,00	5,13	2,60	0,10	3,00	3,10	0,00	360,00
19/03/2000	0,00	0,00	5,26	2,60	0,10	3,00	3,10	0,00	357,00
20/03/2000	0,00	0,00	5,39	2,80	0,00	3,90	3,30	0,00	353,00
21/03/2000	0,00	0,00	5,56	3,00	0,00	3,60	3,60	0,00	349,00
22/03/2000	0,00	15,00	5,82	4,60	0,10	5,40	5,50	0,00	359,00
23/03/2000	0,10	0,00	6,03	2,70	0,00	3,20	3,20	0,00	356,00
24/03/2000	0,10	0,00	6,21	3,10	0,00	3,70	3,70	0,00	352,00
25/03/2000	0,00	0,00	6,36	2,80	0,00	3,50	3,30	0,00	349,00
26/03/2000	0,00	0,00	6,49	3,10	0,00	3,70	3,70	0,00	345,00
27/03/2000	0,00	0,00	6,61	3,30	0,00	4,00	4,00	0,00	341,00
28/03/2000	1,10	0,00	6,71	2,00	0,00	2,70	2,40	0,00	339,00
29/03/2000	0,00	17,00	6,76	3,30	0,00	3,90	3,90	0,00	352,00
30/03/2000	0,00	0,00	6,76	2,40	0,00	2,90	2,90	0,00	349,00

31/03/2000	0,00	0,00	6,73	2,60	0,00	3,10	3,10	0,00	346,00
01/04/2000	0,00	0,00	6,70	3,50	0,00	4,20	4,20	0,00	342,00
02/04/2000	0,10	0,00	6,69	3,60	0,00	4,60	4,30	0,00	338,00
03/04/2000	1,90	0,00	6,62	4,40	0,00	5,90	5,20	0,00	334,00
04/04/2000	0,50	0,00	6,55	4,00	0,00	5,60	4,70	0,00	329,00
05/04/2000	0,10	0,00	6,47	5,10	0,00	7,30	6,00	0,00	321,00
06/04/2000	0,00	0,00	6,37	3,50	0,00	4,20	4,20	0,00	317,00
07/04/2000	0,00	0,00	6,26	3,30	0,00	4,00	4,00	0,00	313,00
08/04/2000	8,30	26,00	6,10	3,10	0,00	3,70	3,70	0,00	344,00
09/04/2000	0,00	0,00	5,95	4,00	0,10	4,70	4,80	0,00	339,00
10/04/2000	0,20	0,00	5,78	4,20	0,10	4,90	5,00	0,00	334,00
11/04/2000	4,70	0,00	5,62	4,20	0,10	4,90	5,00	0,00	334,00
12/04/2000	0,00	0,00	5,45	4,90	0,10	5,70	5,80	0,00	328,00
13/04/2000	0,00	0,00	5,28	2,60	0,10	3,00	3,10	0,00	325,00
14/04/2000	0,00	0,00	5,07	4,50	0,00	6,10	5,20	0,00	319,00
15/04/2000	0,00	16,00	4,84	4,70	0,20	5,40	5,60	0,00	329,00
16/04/2000	0,70	0,00	4,54	6,00	0,30	6,80	7,10	0,00	323,00
17/04/2000	0,00	0,00	4,30	4,60	0,00	5,70	5,40	0,00	317,00
18/04/2000	0,00	0,00	4,08	5,10	0,00	6,00	6,00	0,00	311,00
19/04/2000	0,00	0,00	3,82	4,00	0,00	4,70	4,70	0,00	307,00
20/04/2000	0,00	0,00	3,56	5,20	0,00	6,10	6,10	0,00	300,00
21/04/2000	0,00	0,00	3,30	4,60	0,00	5,30	5,30	0,00	295,00
22/04/2000	0,00	36,00	3,02	5,30	0,60	5,30	6,00	0,00	325,00
23/04/2000	0,00	0,00	2,78	5,30	0,80	5,10	5,90	0,00	319,00
24/04/2000	0,00	0,00	2,57	4,30	0,70	4,00	4,70	0,00	315,00
25/04/2000	0,00	0,00	2,35	4,00	0,80	3,50	4,30	0,00	310,00
26/04/2000	0,00	0,00	2,12	4,10	0,90	3,30	4,30	0,00	306,00
27/04/2000	0,00	0,00	1,90	4,80	0,20	4,70	3,80	0,00	301,00
28/04/2000	0,40	0,00	1,73	5,20	0,10	5,00	3,70	0,00	296,00
29/04/2000	0,00	0,00	1,57	4,80	0,00	4,60	4,60	0,00	292,00
30/04/2000	0,00	35,00	1,37	5,60	2,10	3,10	5,20	0,00	322,00
01/05/2000	0,00	0,00	1,21	3,70	1,60	1,80	3,40	0,00	318,00
02/05/2000	0,00	0,00	1,05	4,00	1,90	1,60	3,50	0,00	315,00
03/05/2000	0,00	0,00	0,87	6,00	3,30	1,90	5,20	0,00	310,00
04/05/2000	0,00	0,00	0,70	8,10	5,00	1,90	6,90	0,00	303,00
05/05/2000	0,00	0,00	0,58	4,90	0,90	1,80	1,60	0,00	300,00
06/05/2000	0,00	29,00	0,49	5,00	3,60	0,70	4,30	0,00	325,00
07/05/2000	0,00	0,00	0,40	4,40	3,30	0,50	3,90	0,00	321,00
08/05/2000	0,00	0,00	0,33	4,20	3,30	0,40	3,80	0,00	317,00
09/05/2000	1,90	0,00	0,26	2,50	2,10	0,20	2,30	0,00	317,00
10/05/2000	1,10	0,00	0,21	2,90	2,50	0,20	2,70	0,00	315,00
11/05/2000	0,00	0,00	0,17	5,10	4,50	0,30	4,80	0,00	310,00
12/05/2000	0,00	0,00	0,13	4,80	4,40	0,20	4,60	0,00	306,00
13/05/2000	0,00	25,00	0,10	4,50	4,20	0,20	4,30	0,00	326,00
14/05/2000	0,00	0,00	0,08	3,60	3,40	0,10	3,50	0,00	323,00
15/05/2000	0,00	0,00	0,06	5,50	5,30	0,10	5,40	0,00	317,00
16/05/2000	0,00	0,00	0,04	4,50	4,40	0,10	4,40	0,00	313,00
17/05/2000	0,00	0,00	0,03	4,30	4,20	0,00	4,30	0,00	309,00

18/05/2000	0,00	0,00	0,02	4,20	2,40	0,90	2,40	0,00	305,00
19/05/2000	0,00	0,00	0,01	4,80	0,00	2,40	2,40	0,00	303,00
20/05/2000	0,10	0,00	0,01	4,30	0,10	2,10	0,10	0,00	301,00
21/05/2000	0,70	0,00	0,01	2,00	0,70	0,60	0,70	0,00	300,00
22/05/2000	2,00	0,00	0,00	3,40	2,00	0,70	2,00	0,00	300,00
23/05/2000	3,60	0,00	0,00	3,10	3,10	0,00	3,10	0,00	300,00
24/05/2000	0,70	0,00	0,00	2,80	1,20	0,80	1,20	0,00	299,00
25/05/2000	43,30	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	2,00	0,00	340,00
26/05/2000	0,00	0,00	0,00	5,50	5,50	0,00	5,50	0,00	335,00
27/05/2000	0,00	0,00	0,00	5,20	5,20	0,00	5,20	0,00	329,00
28/05/2000	0,00	0,00	0,00	5,10	5,10	0,00	5,10	0,00	324,00
29/05/2000	0,00	0,00	0,00	6,50	4,20	1,10	4,20	0,00	319,00
30/05/2000	0,00	0,00	0,00	6,10	0,00	3,00	3,00	0,00	316,00
31/05/2000	0,00	0,00	0,00	6,20	0,00	0,90	0,90	0,00	315,00
01/06/2000	0,00	0,00	0,00	6,50	0,00	0,90	0,90	0,00	314,00
02/06/2000	0,00	0,00	0,00	5,50	0,00	0,80	0,80	0,00	313,00
03/06/2000	0,00	0,00	0,00	5,50	0,00	0,80	0,80	0,00	313,00
04/06/2000	0,00	0,00	0,00	5,30	0,00	0,80	0,80	0,00	312,00
05/06/2000	0,00	0,00	0,00	5,80	0,00	0,80	0,80	0,00	311,00
06/06/2000	0,00	0,00	0,00	5,20	0,00	0,70	0,70	0,00	310,00
07/06/2000	0,00	0,00	0,00	6,90	0,00	1,00	1,00	0,00	309,00
08/06/2000	0,00	0,00	0,00	6,60	0,00	0,90	0,90	0,00	308,00
09/06/2000	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,70	0,70	0,00	308,00

Modèle PILOTE: Résultats de la Simulation

Réserve maxi: 408. mm Réserve mini : 168. mm
Profondeur racinaire maxi Px: 1.20 m
Taux d'accroissement racinaire : .008 m/j
Date de Semis le : 362 ième jour
Date de Début de simulation : 355 ième jour
Date de fin de simulation : 162 ième jour
Valeur Initiale de la Réserve : 401. mm sur Px

Résultats de l'année 2000

Stock sur Px au Semis: 405. mm
Irrigations : dates(jc) et Doses en mm
359 .0
50 27.0
65 11.0
80 15.0
87 17.0
97 26.0
104 16.0
111 36.0
119 35.0
125 29.0
132 25.0
Dose Totale Apportée: 237. mm

Sur le Cycle Cultural:

Etr(Plante+Sol)
Etr : 416. mm
Etm : 416. mm
Evaporation du Sol : 131. mm
Drainage : 10. mm
Hauteur de Pluie : 128. mm

Caractéristiques du Rendement:

Tmat (variété): 2100.°c base 0., soit à:154 JAS
L.A.I Moyen: 4.9 entre 86 et 124 JAS
Matière Sèche Totale: 16.8 T/ha
Rendement (hu: 10.%) : 9.4 T/ha
Rendement (hu:0 %) : 8.5 T/ha

	Apports	Esol	Tplante	ETR	Drainage	LAI_{max}
Bilhyna						
ETM 2000	314,3	20,6	274,2	294,8	57,6	6,5
ETM 2001	429,9	39,8	283,0	322,8	135,8	6,9
ETM 2002	264,6	23,61	274,48	298,03	55,63	6,15
Pilote						
ETM 2000	314,3	102,7	292,4	382,2	10,2	6,76
ETM 2001	429,9	63,3	358,8	412,9	137,4	6,76
ETM 2002	264,6	41,5	378,4	412,6	23,9	6,76

Bilhyna						
MOD 2000	191,30	19,27	241,23	260,58	62,63	6,77
MOD 2001	368,70	36,89	252,31	289,18	109,92	6,92
MOD 2002	251,60	25,06	261,86	286,89	56,43	6,00
Pilote						
MOD 2000	191,30	50,80	301,50	340,80	22,80	6,76
MOD 2001	369,00	95,00	262,50	351,10	107,40	6,76
MOD 2002	251,60	44,10	364,50	399,60	19,40	6,76

Bilhyna						
SEV 2000	144,3	18,72	212,79	231,55	53,87	6,2
SEV 2001	398,5	36,59	252,23	288,82	105,49	6,92
SEV 2002	201,6	23,73	216,08	239,77	55,2	6,01
Pilote						
SEV 2000	144,3	62,3	219,5	270,6	11,3	6,75
SEV 2001	399	118	242,4	353,1	94,8	6,76
SEV 2002	201,6	43,8	329,1	366,3	24,8	6,76

Bilhyna						
PLU2000	104,3	18,56	181,06	199,69	53,3	6,15
PLU2001	306,2	36,9	218,97	255,78	100,09	6,92
PLU2002	136,6	22,6	192,09	214,7	47,64	5,99
PLU2003	458,7	55,29	238,52	293,77	266,87	6,81
PLU2004	417,6	38,36	262,57	300,91	118,1	6,85
PLU2005	276,7	46,94	182,98	229,96	208,61	6,56
Pilote						
PLU2000	104,3	61,3	219	269,6	11,3	6,76
PLU2001	306,2	76,2	254,4	325,9	84,8	6,76
PLU2002	136,6	48,2	267,8	310,2	12,7	6,76
PLU2003	458,7	97,6	286,5	376,6	242,3	6,76
PLU2004	417,6	95,9	256,5	347,6	123,5	6,76
PLU2005	276,7	92	216,5	307,4	171,9	6,77

Annexe N° 09 : STATISTIQUES DES REGRESSIONS REALISEES

Relation entre les Eto Pilote et Bilhyna

Paramètre	Valeur	Ecart type	Probabilité	R2	Test
Ordonnée origine	0,0713	0,0196	0,0003	-	THS
Pente	1,0333	0,0051	0,0000	-	THS
Modèle	-	0,4578	0,0000	95,23	THS

Relation entre les LAI Pilote et Bilhyna					
Paramètre	Valeur	Ecart type	Probabilité	R2	Test
Ordonnée origine	0,6767	0,1787	0,0002	-	THS
Pente	0,7854	0,0390	0,0000	-	THS
Modèle	-	0,9309	0,0000	77,04	THS

Relation entre les LAI mesurés et simulés par Bilhyna					
Paramètre	Valeur	Ecart type	Probabilité	R2	Test
Ordonnée origine	0,4889	0,1760	0,0064	-	HS
Pente	0,9821	0,0426	0,0000	-	THS
Modèle	-	0,9356	0,0000	81,43	THS

Relation entre les LAI mesurés et simulés par Pilote					
Paramètre	Valeur	Ecart type	Probabilité	R2	Test
Ordonnée origine	0,9675	0,2101	0,0000	-	THS
Pente	0,7971	0,0509	0,0000	-	THS
Modèle	-	1,1163	0,0000	66,98	THS

Relation entre les Réserves en eau du sol Pilote et Bilhyna					
Paramètre	Valeur	Ecart type	Probabilité	R2	Test
Ordonnée origine	-52,2864	9,9279	0,0000	-	THS
Pente	1,1347	0,0287	0,0000	-	THS
Modèle	-	19,3520	0,0000	91,46	THS

Relation entre les Réserves en eau du sol mesurées et simulées par Bilhyna					
Paramètre	Valeur	Ecart type	Probabilité	R2	Test
Ordonnée origine	-37,4587	13,8436	0,0076	-	HS
Pente	1,1288	0,0408	0,0000	-	THS
Modèle	-	18,8878	0,0000	83,95	THS

Relation entre les Réserves en eau du sol mesurées et simulées par Pilote					
Paramètre	Valeur	Ecart type	Probabilité	R2	Test
Ordonnée origine	-119,3390	15,4681	0,0000	-	THS
Pente	1,3536	0,0456	0,0000	-	THS
Modèle	-	21,1045	0,0000	85,77	THS

Relation entre les Rendements en grains mesurés et simulés par Pilote					
Paramètre	Valeur	Ecart type	Probabilité	R2	Test
Ordonnée origine	-0,7446	1,7026	0,6734	-	NS
Pente	0,7419	0,2102	0,0077	-	HS
Modèle	-	1,4248	0,0077	60,89	HS