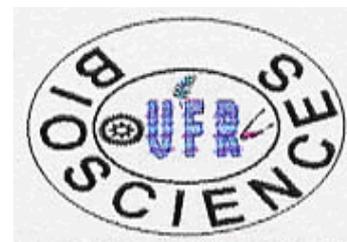


UNIVERSITE DE COCODY
UFR BIOSCIENCES



UFR BIOSCIENCES

22 B.P. 582 ABIDJAN 22
TEL./FAX : (225) 22 44 03 07 / 22 44 37 24

LABORATOIRE DE PHYSIOLOGIE VEGETALE

THESE

Présentée à l'UFR Biosciences pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE COCODY - ABIDJAN

En Physiologie Végétale
Option : Agrométéorologie

Par

ALHASSANE Agali

THEME :

**EFFETS DU CLIMAT ET DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA
CROISSANCE ET LE DEVELOPPEMENT DU MIL (*PENNISETUM GLAUCUM*
[L.] R.BR.) AU SAHEL : CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DU MODELE
SARRA-H DE PREVISION DES RENDEMENTS**

Soutenue publiquement le 22/01/2009 devant le jury composé de :

M. AKE Séverin, Professeur Titulaire, Université de Cocody, Abidjan.....Président
M. ZOUZOU Michel, Maître de conférences, Université de Cocody, Abidjan.....Directeur de Thèse
M. DICK Emmanuel, Maître Assistant Docteur d'Etat, Université de Cocody, Abidjan.....Rapporteur
M. TRAORE Seydou Bréhima, Chargé de recherche PhD, Centre Régional Agrhymet, NiameyExamineur
Mme ATINDEHOU Kamanzi, Professeur Titulaire, Université de Cocody, AbidjanExamineur
M. N'GUESSAN Angelo Evariste Badou, Maître de Recherche, CNRA, AbidjanExamineur

A ma mère, Fouréra Issaleh,

A la mémoire de mon père, Alhassane Seydi

A ma famille.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé sous la supervision académique de l'Université de Cocody, Côte d'Ivoire et grâce à l'appui financier de la Coopération Française au Centre Régional AGRHYMET (CRA), Niger ; institutions auxquelles je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes vifs remerciements. Je remercie également l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) qui a bien voulu assurer la prise en charge de mes déplacements et séjours en alternance entre le CRA et l'Université de Cocody. Le travail a été réalisé en collaboration avec certains centres de recherche que je tiens à remercier. Il s'agit notamment du Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS), Sénégal, de l'équipe Ecotrop du Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) et de l'Institut National de Recherche Agronomique du Niger (INRAN).

Au-delà de ces institutions, je me dois de faire une mention spéciale aux responsables ayant eu une implication décisive dans la réalisation de ce travail, en acceptant de mettre à ma disposition non seulement les fonds, mais aussi les équipements nécessaires à la conduite de mes expérimentations et à la rédaction de mon mémoire. Je remercie particulièrement : Professeur AKE Séverin, Responsable du Laboratoire de Physiologie Végétale de l'UFR Biosciences à l'Université de Cocody, Messieurs Alhassane Adama DIALLO et Mohamed Ould AGHDHAFNA, Directeurs Généraux du CRA, Dr Harold ROY-MACAULEY, Directeur Général du CERAAS, Dr Brahim SIDIBE, Responsable du Département Information et Recherche du CRA, Mr Patrick BISSON, Conseiller technique du DG au CRA, Mr Bakary DJABY, Responsable de l'Unité Méthodes et Applications et Mr Abdallah SAMBA, Responsable de l'Unité Sécurité Alimentaire et Accès aux Marchés au CRA.

J'exprime ma profonde gratitude au Professeur Michel ZOUZOU enseignant chercheur à l'UFR Biosciences de l'Université de Cocody, Abidjan, pour avoir accepté la direction de ma thèse avec un intérêt très affiché et surtout la priorité qu'il a toujours voulu donner à mon travail. Ma reconnaissance va aussi à l'endroit du Dr Seydou TRAORE, Expert Agrométéorologue au CRA, pour, non seulement l'encadrement scientifique qu'il a bien voulu m'assurer avec un esprit combien collégial, mais aussi sa disponibilité et la promptitude avec laquelle il a toujours répondu à mes sollicitations. J'adresse aussi mes remerciements au Dr Benoit SARR, Expert Agroclimatologue au CRA, Dr Omar DIOUF chercheur au CERAAS et Dr Moustapha AMADOU de l'INRAN, pour leur collaboration et surtout, les orientations qu'ils m'ont données en toute disponibilité, tant pendant les expérimentations que dans la rédaction du manuscrit. Je ne peux m'empêcher de manifester ma reconnaissance aux membres de l'équipe Ecotrop du CIRAD dont Mr Christian BARON, Mr Michael DINGKUHN, Mr Jean Claude COMBRES et Mr Vincent BONNAL, pour les

éclaircissements qu'ils n'ont cessé de m'apporter sur le modèle SARRA-H. Je remercie tous les experts et techniciens qui ont, d'une manière ou d'une autre, bien voulu collaborer ou sympathiser avec moi, pendant mon stage au CRA.

Je renouvelle ma gratitude au Professeur Séverin AKE pour avoir accepté d'assurer la présidence de mon Jury de thèse et pour les riches enseignements qu'il m'a donnés au DEA.

Je tiens à remercier Dr DICK Emmanuel pour avoir accepté de rapporter cette thèse. J'exprime également ma reconnaissance aux Professeur Kamanzi ATINDEHOU, Dr Angelo Evariste Badou N'GUESSAN et Dr Seydou Bréhima TRAORE pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'examiner cette thèse. J'apprécie, du fond de mon cœur, la confiance qui est placée en moi par ces excellents et bienveillants membres de mon jury.

Au-delà de ce que je leur dois socialement, je tiens à remercier tous les manœuvres, aussi bien du CRA que du CERAAS, pour avoir coulé assez de leurs sueurs sous le torride soleil du Sahel, dans le cadre de mes travaux expérimentaux et surtout pour avoir toujours su tolérer mes humeurs quelques fois mauvaises à leurs égards.

Pendant mon stage au CRA, j'ai partagé le bureau et les mêmes préoccupations (à l'égard des défis agro-climatiques qui se posent à nous au Sahel) avec des stagiaires, notamment Mohamed HAMATAN, Seyni SALACK, Mahamane Dan GALADIMA, Aïssata SITA, etc., à l'endroit desquels j'adresse ma satisfaction et mon amitié pour le temps passé ensemble, la compréhension mutuelle qui a toujours régné entre nous. Je suis aussi très reconnaissant de l'aide qui m'a été apportée par les amis Dr Abdoulaye ASSANE, Mr Doulla RHISSA et Mr Halid ALHASSANE, dans la préparation de ma soutenance. J'exprime mon amitié et mes encouragements à tous les doctorants du Laboratoire de Physiologie Végétale du UFR Biosciences à l'Université de Cocody.

Il ne me serait sans doute pas possible de mentionner toutes les personnes impliquées dans ce travail et je voudrais tout simplement dire grand merci à toutes.

RESUME

Au Centre Régional AGRHYMET (CRA), le suivi opérationnel des campagnes agricoles et la prévision des rendements de mil dans les pays du Sahel s'effectuent à l'aide du modèle Diagnostic Hydrique des Cultures (DHC). Ceci permet aux autorités de ces pays ainsi qu'à leurs partenaires, d'anticiper les crises alimentaires et d'atténuer leurs effets sur les populations. Toutefois, dans les conditions où l'eau n'est pas un facteur limitant, les performances du modèle DHC se sont avérées limitées, ce qui a conduit au développement du modèle SARRA-H intégrant le bilan carboné. L'objectif de ce travail est d'évaluer ce nouvel outil dans des conditions de culture contrastées. Pour cela, des données ont été collectées pendant les saisons pluvieuses des années 2002 et 2003 sur les variétés de mil HKP (90 jours), ZATIB (105 jours) et MTDO (120 jours) testées dans 3 différents essais au CRA. Un 4^e essai a été conduit sur la variété ZATIB, en contre-saison au cours de l'année 2004, à Bambey au Sénégal. Les mesures effectuées dans ces essais ont porté aussi bien sur les variables météorologiques que sur la phénologie, l'accumulation de biomasse aérienne, l'indice de surface foliaire (LAI), la variation de l'humidité et de l'évaporation du sol et les composantes du rendement à la récolte. Les résultats ont montré que toutes les variétés testées sont photosensibles, du fait que la durée de leurs cycles et leurs rendements ont été réduits avec le retard du semis, aussi bien en 2002 qu'en 2003. L'apport d'urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) a augmenté le LAI et le rendement paille de toutes les 3 variétés. La MTDO a été la plus productive en paille, mais la moins productive en grains, après la HKP et la ZATIB, aussi bien en présence d'urée qu'en son absence. Avec la variété ZATIB, l'apport d'urée a beaucoup plus contribué à la variation de l'humidité du sol du fait du développement foliaire qu'il a favorisé avec toutes les densités de semis. L'accroissement du LAI résultant de l'apport d'urée et/ou la forte densité de semis a augmenté la sensibilité de la culture à la sécheresse en 2002. La faible densité de semis (D1) a été la plus indiquée pour permettre aux plants de mieux bénéficier de la dose d'urée apportée. En l'absence d'urée, la forte densité de semis (D2) a eu un impact négatif sur l'accumulation de matière sèche. Les résultats des irrigations complémentaires faites au CRA et ceux obtenus à Bambey ont montré que l'accroissement de la production du mil à travers l'augmentation de la fertilité du sol et de la densité de semis ne peut se faire de manière durable qu'en conditions d'alimentation hydrique favorables. Les résultats obtenus en conditions hydriques optimales à Bambey ont servi à adapter le modèle SARRA-H. Ceux obtenus en situations de stress hydriques à Bambey et en conditions pluviales strictes à Niamey ont servi à son évaluation. Les résultats de Bambey ont montré une adéquation nette entre valeurs observées et simulées en biomasse aérienne et en rendements grains. Ceux de Niamey ont, quant à eux, donné des écarts souvent grands, du fait de la variation de la fertilité du sol et de ses impacts, selon le régime hydrique et la densité de semis. Des ajustements des paramètres du modèle, notamment du coefficient de conversion de la lumière (ϵ_{btot}), ont permis d'avoir une réduction satisfaisante des écarts entre rendements simulés et observés.

Mots clés : Alerte précoce, sécurité alimentaire, date de semis, fertilisation azotée, densité de semis, accumulation de matière sèche, LAI, consommation hydrique, modélisation, prévision des rendements, mil (*Pennisetum glaucum* [L.] Br), Niger, Sahel.

ABSTRACT

The crop water balance simulation model (DHC) is used at the AGRHYMET Regional Center (ARC) for operational crop monitoring and yield forecasting in CILSS member countries. This allows the national authorities and their partners to prevent food crises and therefore reduce their effect on the people. However, when rainfall is sufficiently available for the crops development, the DHC model does not perform well. To overcome this limitation, the SARRA-H model, which takes into account the carbon balance, was developed. The present work aims at evaluating this new tool under contrasting cropping conditions. For this purpose, data were collected during the 2002 and 2003 cropping seasons on three millet varieties: HKP (90 days), ZATIB (105 days) and MTDO (120 days), which have been tested on three separate field trials at ARC. A fourth trial was conducted on the ZATIB variety during the 2004 dry season in Bambey, Senegal. The measurements made in these trials concerned meteorological variables as well as phenology, accumulation of above ground, leaf area index (LAI), soil moisture, soil evaporation, and yield components at harvest. The results showed that all the tested varieties were sensible to photoperiod, because their cycle durations and yields were reduced with delayed sowing, both in 2002 and 2003. The use of urea ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) increased LAI and straw yield for all three varieties. The MTDO variety was the most productive in straw, but produced fewer grains than HKP and ZATIB both with and without urea application. With the ZATIB variety, application of urea had the most important impact on the soil moisture variation, because it had favored leaf area development under all the sowing densities. The crop sensitivity to drought was increased because of the high development in LAI that resulted from urea application and/or high sowing density. The lower sowing density (D1) was the best fitted for the plants to benefit better from urea application. Without adding urea, the high sowing density (D2) had a negative impact on the dry matter accumulation. The results of complementary irrigation done at CRA and those obtained from Bambey showed that boosting millet production by increasing soil fertility and sowing density can be sustained only under favourable water supply conditions. The results obtained under optimum water conditions at Bambey were used to adapt the SARRA-H model. Those obtained under water deficit conditions at Bambey and under rainfed conditions in Niamey were used for model evaluation. The results obtained from Bambey showed a clear adequation between the observed and simulated values of above ground biomass and grains yields. Those from Niamey, on the other hand, gave generally large differences between observed and simulated values, attributable to the variation in soil fertility and its impacts, depending on the water regime and the sowing density. Adjustments of the model parameters, notably, the light conversion coefficient (ϵ_{tot}) allowed obtain a satisfactory reduction of the deviations between observed and simulated yields.

*Keywords : Early warning, food security, sowing date, nitrogen fertilization, sowing density, dry matter accumulation, leaf area index (LAI), water consumption, modelling, yield forecasting, pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] Br), Niger, Sahel.*

SIGLES ET ABREVIATIONS

AGRHYMET : Centre Régional de formation et d'applications en Agrométéorologie et Hydrologie opérationnelles

α : Albédo

Biomfeuille : Biomasse feuille

Biomgainj : Gain journalier en biomasse

Biomtot : Biomasse totale

BiomTotStadeIp : Biomasse au stade d'initiation paniculaire

BiomtotStadeRPR : Biomasse au stade de la floraison

BIP : Bilan hydrique pentadaire

BVP : Basic Vegetative Period (phase phénologique allant de la levée à l'initiation paniculaire)

CERAAS : Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse

CN : Comptage neutronique

CN_{corr} : Comptage Neutronique corrigé

CNRA : Centre National de Recherche Agronomique

CILSS : Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CRA : Centre Régional AGRHYMET

CSTR : Constante de Stress (ou Indice de contrainte hydrique du sol)

D : Pertes d'eau par drainage hors de la zone racinaire

D1 : Traitement de la faible densité de semis (16666 plants ha⁻¹)

D2 : Traitement de la forte densité de semis (31250 plants ha⁻¹)

da : Densité apparente

DayRdt : Rendement journalier

DayRdtPot : Rendement journalier potentiel

DHC : Diagnostic Hydrique des Cultures, modèle de simulation du bilan hydrique

DIAPER : Diagnostic permanent, Projet d'enquêtes agricoles dans les pays du CILSS

Ecotrop : Unité de recherche en Ecophysiologie Tropicale, CIRAD

ϵ_b (Epsilon b) : Efficience de conversion de la radiation interceptée en matière sèche

ETM ou **ETRM**: Evapotranspiration maximale

ETo : Evapotranspiration de référence

ETR : Evapotranspiration réelle

EvapPot : Evaporation potentielle

EVj : Evaporation journalière

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

FESW : Fraction of evaporable soil water (fraction d'eau évaporable dans le sol)

FL1 : Phase phénologique allant de l'initiation paniculaire à la fin montaison

FL2 : Phase phénologique allant de l'épiaison à la formation de grains laitieux

FNRAA : Fonds National de Recherches Agricoles et Agroalimentaires, Sénégal

FTSW : "Fraction of transpirable soil water" (fraction d'eau du sol transpirable par les plantes)

GMS : "Grid Mass Selection" (Sélection massale par grille)

h : Hauteur

HI : "Harvest index" (Indice de récolte)

Hp : Humidité pondérale

Hv : Humidité volumique

I : Apport d'eau par irrigation

ICRISAT : International Crop Research Institute for Semi-Arid Tropics

IDV : Initiation au Développement Végétatif (phase phénologique allant de la levée au tallage)

INRAN : Institut National de Recherche Agronomique du Niger

IRAT : Institut de Recherche en Agronomie Tropicale

IRES : Indice de rendements espérés

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

JAS : Jours après semis

K : Coefficient d'extinction de la lumière

Kbasefeuille : Base de la relation entre la biomasse aérienne et le rapport biomasse feuille/biomasse aérienne

K_C : Coefficient cultural

K_{CE} : Part du coefficient cultural due à l'évaporation sol

K_CMAX : Coefficient cultural maximal

K_{CP} : Part du coefficient cultural due à la transpiration de la plante

Kmulch : Coefficient de rugosité du sol

Kpentefeuille: Pente de la relation entre le rapport (biomasse feuille/biomasse aérienne) et la biomasse aérienne

kRdt : Coefficient d'évaluation du rendement potentiel à partir de la différence de biomasses entre les stades de la floraison et de l'initiation paniculaire

Krealloc : Coefficient de réallocation des réserves

L : Longueur

LAI : Leaf area index (Index de surface foliaire)

LIG : Ligulé (feuille ligulée)

lmax : Largeur maximale

LTR : Fraction de radiation lumineuse non interceptée par le couvert

Matu1 : Phase de maturité allant de la floraison à la maturité cireuse

Matu2 : Phase de maturité allant de la maturité cireuse à la maturité totale

MAT : Maturité

N0 : Traitement témoin d'urée (0 kg ha⁻¹)

N1 : Traitement fertilisé d'urée (100 kg ha⁻¹)

Nbre : Nombre

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

P : Apports d'eau dus aux précipitations

P_{humide} : Poids humide

P_{sec} : Poids sec

PAR : Radiation photosynthétiquement active

parP : Paramètre spécifique à chaque espèce qui exprime le seuil critique d'humidité du sol à partir duquel le stress hydrique réduit linéairement la transpiration

pF₄ : Point de flétrissement

pFactor : Coefficient pour le calcul du taux de transpiration

Poq : Poquet

PSP : Photoperiod-sensitive period (phase sensible à la photopériode)

R : Echanges latéraux d'eau

RC : Remontée capillaire de l'eau dans la zone de prospection racinaire

RDU : Réserve difficilement utilisable

Rdt: Rendement

RdtPot : Rendement potentiel

RespMaint : Respiration de maintenance

Restcrois : Déficit de croissance

RFU : Réserve facilement utilisable

Rg : Rayonnement global

Rn : Rayonnement net

RPR : Reproductive period (phase allant de l'initiation paniculaire à la floraison)

RR : Rayonnement réfléchi

RU : Réserve utile

RUR : Réserve utile racinaire

S1 : Traitement de Stress hydrique 1 (appliqué pendant la montaison)

S2 : Traitement de Stress hydrique 2 (appliqué pendant l'épiaison-floraison)

SARRA-H: Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques (H = habillé)

SLA : Specific Leaf Area (surface massique des feuilles)

Somtemp : Somme de températures (temps thermiques)

Ta : Température de l'air

Tbase : Température de base (minimale) permettant la germination et la croissance de la culture

Tc : Température du couvert

Tlim : Température limite

Tmax : Température maximale

Tmin : Température minimale

Topt : Température optimale

TR : Transpiration réelle

TRj : Transpiration journalière

TrPot : Transpiration potentielle

Trt : Traitement

VIV : Vivante (feuille vivante)

ZCIT : Zone de convergence intertropicale

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
RESUME.....	III
ABSTRACT	IV
SIGLES ET ABREVIATIONS	V
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX	XVII
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	4
Chapitre 1 : Caractéristiques économiques et bio-physiologiques du mil.....	4
1.1. Importance économique	4
1.2. Origine et systématique	5
1.3. Caractéristiques botaniques et biologiques.....	5
1.4. Physiologie de la croissance et du développement.....	8
Chapitre 2 : Exigences pédoclimatiques du mil.....	11
2.1. Sol.....	11
2.2. Lumière	11
2.3. Température	18
2.4. Interférence photopériodisme - thermopériodisme	19
2.5. Eau	20
2.6. Impact du stress hydrique et mécanismes d'adaptation.....	20
Chapitre 3 : Exigences agronomiques du mil	22
3.1. Fertilisation	22
3.2. Densité de semis	24
3.3. Labour et sarclages	24
Chapitre 4 : Eléments du bilan hydrique et leur variabilité	26
4.1. Bilan hydrique	26
4.2. Variabilité de l'ETR.....	26
4.3. Variabilité de l'ETM.....	27
4.4. Variabilité de l'ETo.....	30
4.5. Evaluation des coefficients culturaux (K_c) du mil.....	31
5.1. Historique et limites du modèle utilisé par l'Agrhymet.....	34
5.2. Conception et fonctionnement du modèle SARRA-H.....	40
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	47
Chapitre 6 : Expérimentations au CRA (Niger)	47
6.1. Conditions physiques du milieu d'étude	47
6.2. Matériel végétal	52
6.3. Méthodes	52
Chapitre 7 : Expérimentations à Bambey (Sénégal)	68
7.1. Conditions physiques du milieu d'étude	68
7.2. Matériel végétal	70
7.3. Méthodes	70
Chapitre 8 : Paramétrage du modèle SARRA-H	73
8.1. Interception de la lumière et production de matière sèche	74
8.2. Relations allométriques.....	74

8.3. Durées des stades phénologiques en temps thermique	76
8.4. Besoins maxima en eau	76
8.5. Variables d'entrée du modèle SARRA-H	78
Chapitre 9 : Exploitation des données	80
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	81
Chapitre 10 : Expérimentations au CRA	81
10.1. Accumulation de biomasse aérienne.....	81
10.2. Evolution de l'indice de surface foliaire (LAI)	98
10.3. Hauteur des plants	110
10.4. Effet de la date de semis sur la phénologie des 3 variétés de mil	121
10.5. Effet de la date de semis sur la durée du cycle des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO.....	128
10.6. Effet de l'urée sur l'épiaison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO	131
10.7. Effet de la densité de semis et de l'urée sur la variation de l'humidité du sol..	133
10.8. Effet de la densité de semis et de l'urée sur la variation de l'ETR.....	140
10.9. Effets de l'urée et de la densité de semis sur l'évaporation du sol.....	144
10.10. Effet de la date de semis sur les rendements des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO.....	148
10.11. Effet de l'urée sur les rendements des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO	152
10.12. Effet de l'urée et de la densité de semis sur les rendements de la variété de mil ZATIB.....	155
10.13. Effet de l'urée et de la densité de semis sur l'efficacité d'utilisation d'eau par la variété de mil ZATIB.....	159
10.14. Conclusion partielle.....	161
Chapitre 11 : Expérimentations à Bambey	163
11.1 Croissance et développement de la culture	163
11.2. Variation de l'humidité du sol dans la zone racinaire	181
11.3. Conclusion partielle.....	188
Chapitre 12 : Résultats du calibrage du modèle SARRA-H.....	189
12.1. Validation du modèle	191
12.2. Sensibilité du modèle aux conditions de culture au CRA : effets de la date de semis, de l'apport d'urée et de la densité de semis	201
12.3. Ajustement du modèle pour les résultats expérimentaux du CRA	210
12.4. Conclusion partielle.....	220
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	221
BIBLIOGRAPHIE	223
ANNEXES	236

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Plants de mil au stade épiaison-floraison.	7
Figure 2 : Schéma d'amélioration du modèle SARRA en SARRA-H (<i>Baron et Dingkuhn, 2003</i>)	39
Figure 3 : Estimation du rendement : relation empirique (R) en fin de cycle entre les rendements simulés par DHC et les rendements observés au Sénégal par le Réseau DIAPER.....	39
Figure 4 : Modèle de bilan hydrique à deux réservoirs (<i>Baron et Dingkuhn, 2003</i>).....	42
Figure 5 : Stades phénologiques des céréales.	45
Figure 6 : Zones climatiques du Niger et variation des isohyètes des précipitations entre le périodes 1951-1980 et 1961-1990 (<i>adapté de Sivakumar, 1993</i>).....	48
Figure 7 : Pluviométrie et évapotranspiration de référence (ET _o) journalières en 2002 au Centre Régional Agrhymet, Niamey	51
Figure 8 : Pluviométrie et évapotranspiration de référence (ET _o) journalières en 2003 au Centre Régional Agrhymet, Niamey	51
Figure 9 : Pluviométries décennales 2002 et 2003 (Centre Régional Agrhymet, Niamey) comparées aux fréquences 75 %, 25 % et la médiane de la période 1971-2000 (Niamey aéroport).....	51
Figure 10 : Station météorologique automatique au Centre Régional Agrhymet.....	58
Figure 11 : Relation entre surface foliaire réelle (planimètre) et brute (L x l _{max}) de la variété de mil HKP. Agrhymet, 2002 et 2003.	61
Figure 12 : Relation entre surface foliaire réelle (planimètre) et brute (L x l _{max}) de la variété ZATIB. Agrhymet, 2002 et 2003.....	61
Figure 13 : Relation entre surface foliaire réelle (planimètre) et brute (L x l _{max}) de la variété de mil MTDO. Agrhymet, 2002 et 2003.	61
Figure 14 : Relation entre surface foliaire et poids sec des feuilles vertes de la variété de mil HKP. Agrhymet, 2002 et 2003.....	62
Figure 15 : Relation entre surface foliaire et poids sec des feuilles vertes de la variété de mil ZATIB. Agrhymet, 2002 et 2003.	62
Figure 16 : Relation entre surface foliaire et poids sec des feuilles vertes de la variété de mil MTDO. Agrhymet, 2002 et 2003.	62
Figure 17 : Le microlysimètre et ses composantes :	66
Figure 18 : Cumuls pluviométriques moyens annuels (1951-1990), en ligne continue et cumuls pluviométriques au cours d'une normale sèche (1961-1990). <i>Le cercle indique la zone de Bambey (adapté de Diouf, 2000)</i>	69
Figure 19 : Evolution inter annuelle de la pluviométrie, de 1950 à 1998 à la station de Bambey (<i>Diouf, 2000</i>).	69
Figure 20 : Relation entre le quotient (biomasse foliaire/biomasse aérienne) et la biomasse aérienne de la variété ZATIB du mil pour 2 densités de semis : D1 = 16 666 plants ha ⁻¹ (A) et D2 = 31 250 plants ha ⁻¹ (B), en situations hydrique et de fertilité du sol non limitantes. Bambey 2004.....	75
Figure 21 : Evolution du poids sec (g m ⁻²) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil HKP en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet</i>). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.	82
Figure 22 : Evolution du poids sec (g m ⁻²) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil HKP en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet</i>). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	82

Figure 23 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil ZATIB en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet</i>). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	83
Figure 24 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil ZATIB en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet</i>). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	83
Figure 25 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet</i>). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	84
Figure 26 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet</i>). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	84
Figure 27 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété HKP en fonction du niveau d'apport d'urée (<i>N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	87
Figure 28 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété HKP en fonction du niveau d'apport d'urée (<i>N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	87
Figure 29 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété ZATIB en fonction du niveau d'apport d'urée (<i>N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	88
Figure 30 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété ZATIB en fonction du niveau d'apport d'urée (<i>N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	88
Figure 31 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété MTDO en fonction du niveau de fertilisation azotée (<i>N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	89
Figure 32 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété MTDO en fonction du niveau d'apport d'urée (<i>N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	89
Figure 33 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol non fertilisé en conditions pluviales strictes (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹, D2 = 31250 plants ha⁻¹, N0 = 0 kg ha⁻¹ d'urée</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	92
Figure 34 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol non fertilisé en conditions pluviales strictes (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹, D2 = 31250 plants ha⁻¹, N0 = 0 kg ha⁻¹ d'urée</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	92
Figure 35 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol fertilisé en urée en conditions pluviales strictes (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹, D2 = 31250 plants ha⁻¹, N1 = 100 kg ha⁻¹ d'urée</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	93
Figure 36 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol fertilisé en urée en conditions pluviales strictes (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹, D2 = 31250 plants ha⁻¹, N1 = 100 kg ha⁻¹ d'urée</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	93
Figure 37 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol non fertilisé en irrigué (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹, D2 = 31250 plants ha⁻¹, N0 = 0 kg ha⁻¹ d'urée</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	94
Figure 38 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol non fertilisé en irrigué (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹, D2 = 31250 plants ha⁻¹, N0 = 0 kg ha⁻¹ d'urée</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	94

Figure 39 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol fertilisé en irrigué ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	95
Figure 40 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol fertilisé en irrigué ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	95
Figure 41 : Evolution du LAI des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet</i>). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	99
Figure 42 : Evolution du LAI des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet</i>). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	99
Figure 43 : Evolution du LAI des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la fertilisation azotée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	102
Figure 44 : Evolution du LAI des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	102
Figure 45 : Evolution du LAI en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée, en conditions hydriques pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	105
Figure 46 : Evolution du LAI en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée, en conditions hydriques pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	105
Figure 47 : Evolution du LAI en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée, en conditions d'irrigations complémentaires ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	106
Figure 48 : Evolution du LAI en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée, en conditions d'irrigations complémentaires ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	106
Figure 49 : Evolution comparée du LAI en conditions pluviales strictes et d'irrigations complémentaires : effet du régime hydrique et de la densité de semis sur le développement des plants fertilisés en urée ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	107
Figure 50 : Evolution comparée du LAI en conditions pluviales strictes et d'irrigations complémentaires : effet du régime hydrique et de la densité de semis sur le développement des plants fertilisés en urée ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	107
Figure 51 : Hauteur des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	111
Figure 52 : Hauteur des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	111
Figure 53 : Hauteur des plants des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	113

Figure 54 : Hauteur des plants des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.	113
Figure 55 : Hauteur des plants de la variété de mil ZATIB en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée en conditions pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.	116
Figure 56 : Hauteur des plants de la variété de mil ZATIB en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée en conditions pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.	116
Figure 57 : Hauteur des plants de la variété de mil ZATIB en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée en conditions d'irrigations complémentaires ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.	117
Figure 58 : Hauteur des plants de la variété de mil ZATIB en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée en conditions d'irrigations complémentaires ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.	117
Figure 59 : Relation entre la hauteur des plants et le développement du LAI de trois variétés de mil : HKP, ZATIB et MTDO. Agrhymet, 2002 et 2003.	120
Figure 60 : Fréquence d'apparition des jeunes feuilles ligulées (A) et de mort de celles plus âgées (B) chez les variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet</i>). Agrhymet, 2002.	123
Figure 61 : Suivi de l'épiaison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 24 juin et Date2 = 22 juillet</i>). Agrhymet, 2002.	125
Figure 62 : Suivi de l'épiaison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet</i>). Agrhymet, 2003.	125
Figure 63 : Suivi de la floraison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 24 juin et Date2 = 22 juillet</i>). Agrhymet, 2002.	126
Figure 64 : Suivi de la floraison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet</i>). Agrhymet, 2003.	126
Figure 65 : Suivi de la maturité des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 24 juin et Date2 = 22 juillet</i>). Agrhymet, 2002.	127
Figure 66 : Suivi de la maturité des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet</i>). Agrhymet, 2003.	127
Figure 67 : Effet de l'urée sur l'épiaison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002 (A) et 2003 (B)	132
Figure 68 : Variation du stock d'eau dans les tranches de sol 0-40 cm sous les effets de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales, chez la variété de mil ZATIB. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.	134
Figure 69 : Variation du stock d'eau dans les tranches de sol 0-40 cm sous les effets de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales, chez la variété de mil ZATIB. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.	134
Figure 70 : Variation du stock d'eau dans les tranches de sol 0-80 cm sous les effets de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.	135
Figure 71 : Variation du stock d'eau dans les tranches de sol 0-80 cm sous les effets de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et de	

l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.	135
Figure 72 : Evolution comparée du stock d'eau dans la tranche de sol 0 - 40 cm en pluvial strict et en irrigué, sous le traitement D2 (31 250 plants ha^{-1}) x N1 (100 kg ha^{-1} d'urée). Agrhymet, 2002.....	138
Figure 73 : Evolution comparée du stock d'eau dans la tranche de sol 0 - 40 cm en pluvial strict et en irrigué, sous le traitement D2 (31 250 plants ha^{-1}) x N1 (100 kg ha^{-1} d'urée). Agrhymet, 2003.....	138
Figure 74 : Variation du stock d'eau dans la tranche 0-40 cm du sol selon la densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et le niveau d'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions d'irrigations complémentaires. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.	139
Figure 75 : Variation du stock d'eau dans la tranche 0-80 cm du sol selon la densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et le niveau d'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions d'irrigations complémentaires. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.	139
Figure 76 : Variation de l'ETR de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales strictes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.....	141
Figure 77 : Variation de l'ETR de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales strictes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	141
Figure 78 : Variation de l'ETR de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions d'irrigations complémentaires. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.....	143
Figure 79 : Variation de l'évaporation sol sous le couvert de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions hydriques pluviales. Agrhymet, 2003.	146
Figure 80 : Variation de l'évaporation sol sous le couvert de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions d'irrigations complémentaires. Agrhymet, 2003.....	146
Figure 81 : Variation de l'évaporation sol sous l'influence des humidités relatives maximales journalières pour 2 densités de semis de la variété de mil ZATIB : D1 (16666 plants ha^{-1}) et D2 (31250 plants ha^{-1}) associées à 2 doses d'urée N0 (0 kg ha^{-1}) et N1 (100 kg ha^{-1}), en conditions hydriques pluviales. Agrhymet, 2003.	147
Figure 82 : Proportions occupées par l'évaporation sol dans les ETR journalières de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions hydriques pluviales. Agrhymet, 2003.	147
Figure 83 : Evolution de la matière sèche des feuilles de la variété de mil ZATIB sous l'impact de 3 régimes hydriques ($ETM = \text{évapotranspiration maximale}$, $S1 = \text{stress pendant la montaison}$ et $S2 = \text{stress pendant l'épiaison}$) associés à 2 densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.	165
Figure 84 : Evolution de la matière sèche des tiges de la variété de mil ZATIB sous l'impact de 3 régimes hydriques ($ETM = \text{évapotranspiration maximale}$, $S1 = \text{stress pendant la montaison}$ et $S2 = \text{stress pendant l'épiaison}$) associés à 2 densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), en conditions de fertilité	

du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambeý, 2004.	165
Figure 85 : Evolution de la matière sèche des épis de la variété de mil ZATIB sous l'impact de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹</i>), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambeý, 2004.	166
Figure 86 : Production en grains de la variété de mil ZATIB sous l'impact de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹</i>), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambeý, 2004.	166
Figure 87 : Corrélation entre les résultats de deux méthodes de mesure du LAI de la variété de mil ZATIB : la méthode combinant la mesure de la surface (au planimètre Delta-T MK2 type AMS) et du poids sec des feuilles, et la méthode du LAI-mètre (LAI 2000, plant canopy analyser Li-cor). Bambeý, 2004.	168
Figure 88 : Indice de surface foliaire (LAI) évalué par LAI-mètre (LAI 2000, plant canopy analyser Li-cor) pour la variété de mil ZATIB soumise à 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹</i>), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambeý, 2004.	168
Figure 89 : Effet de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹</i>) sur la conductance stomatique de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambeý, 2004.	170
Figure 90 : Effet de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹</i>) sur la transpiration foliaire de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambeý, 2004.	170
Figure 91 : Effet de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹</i>) sur la température du couvert de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambeý, 2004.	172
Figure 92 : Effet de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹</i>) sur le rythme d'apparition des feuilles sur les plants de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambeý, 2004.	175
Figure 93 : Effet de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹</i>) sur la mortalité des feuilles sur les plants de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambeý, 2004.	175
Figure 94 : Effet de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis (<i>D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹</i>) sur le nombre de talles vivantes sur les plants de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambeý, 2004.	176

Figure 95 : Couverture végétative des plants de la variété de mil ZATIB en fonction des densités de semis $D1 = 16\ 666\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ (A) et $D2 = 31\ 250\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ (B), dans des conditions hydriques et de fertilité du sol non limitantes. Bambey, 2004.	180
Figure 96 : Effet de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis ($D1 = 16666\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ et $D2 = 31250\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$) sur le stock d'eau dans les tranches 0-40 cm (A) et 0-80 cm (B) du sol. Variété de mil ZATIB soumise à des conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambey, 2004.	182
Figure 97 : Effet de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis ($D1 = 16666\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ et $D2 = 31250\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$) sur la variation de l'ETR de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.	185
Figure 98 : Effet de 3 régimes hydriques (<i>ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison</i>) associés à 2 densités de semis ($D1 = 16666\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ et $D2 = 31250\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$) sur la variation de la fraction d'eau disponible pour les racines de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambey, 2004.	187
Figure 99 : Comparaison, après calibrage, des résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de $16666\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ en régime hydrique ETM. Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.	190
Figure 100 : Validation du modèle pour la densité de semis de la variété de mil ZATIB $D2$ ($31250\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$) associée au régime hydrique ETM : résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.	192
Figure 101 : Validation du modèle pour la densité de semis de $16666\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ de la variété de mil ZATIB soumise à un stress hydrique pendant la montaison (S1) : résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.	195
Figure 102 : Validation du modèle pour la densité de semis de $31250\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ de la variété de mil ZATIB soumise à un stress hydrique pendant la montaison (S1) : résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.	196
Figure 103 : Validation du modèle pour la densité de semis de $16666\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ de la variété de mil ZATIB soumise à un stress hydrique pendant l'épiaison (S2) : résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.	197
Figure 104 : Validation du modèle pour une densité de semis de $31250\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ de la variété de mil ZATIB soumise à un stress hydrique pendant l'épiaison (S2) : résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.	198
Figure 105 : Fraction d'eau du sol transpirable par la culture : variation des résultats observés (<i>Obs</i>) et simulés (<i>Sim</i>) selon la densité de semis ($D1 = 16666\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ et $D2 = 31250\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$) et le régime hydrique : ETM (A), stressé S1 (B) et stressé S2 (C). Bambey, 2004.	200
Figure 106 : Résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$ et $D2 = 31250\ \text{plants}\ \text{ha}^{-1}$), sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002.	202

Figure 107 : Résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2003.	203
Figure 108 : Résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de $20\ 000 \text{ plants ha}^{-1}$, sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002 et 2003.	205
Figure 109 : Résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de $20\ 000 \text{ plants ha}^{-1}$ à 2 dates différentes (<i>Date 1 et Date 2</i>), sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002.	207
Figure 110 : Résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de $20\ 000 \text{ plants ha}^{-1}$ à 2 dates différentes (<i>Date 1 et Date 2</i>), sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2003.	208
Figure 111 : Résultats observés et simulés (ajustés avec $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$) en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2003.	212
Figure 112 : Résultats observés et simulés (ajustés avec $\epsilon_b = 4,3 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$) en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2003.	213
Figure 113 : Résultats observés et simulés (ajustés avec $\epsilon_b = 5 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2002 et $4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2003) en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de $20\ 000 \text{ plants ha}^{-1}$, sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002 et 2003.	214
Figure 114 : Résultats observés et simulés (ajustés avec $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$) en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à $10\ 000 \text{ plants ha}^{-1}$ et à 2 dates différentes (<i>Date 1 et Date 2</i>). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2003.	215
Figure 115 : Biomasse aérienne observée et simulée (ajustés avec $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour N0D1, $4,2 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour N0D2 en 2002 et $4,2 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour N0D1, $4,0 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour N0D2 en 2003) de la variété de mil ZATIB semée aux densités $D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$ sur un sol non fertilisé en urée (N0) et sous un régime hydrique pluvial strict. Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002 (A) et 2003 (B).	218
Figure 116 : Biomasse aérienne observée et simulée (ajustés avec $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2002 et $4,5 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2003) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de $20\ 000 \text{ plants ha}^{-1}$ sur un sol non fertilisé en urée (N0) et sous un régime hydrique pluvial strict. Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002 et 2003.	219

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Durée moyenne, en jours, des phases du cycle végétatif du mil (DIOP, 1999).....	10
Tableau II : Efficacité de conversion de la radiation absorbée (Eca), chez le mil (Anonyme, 1993).....	14
Tableau III : Densité de semis en fonction de la pluviosité, du cycle variétal et de la fertilité du sol (Anonyme, 1993)	25
Tableau IV : Besoins en eau de 3 variétés de mil mesurés par Valet et Albert (1976) à Tillabery au Niger (Amadou; 1994).	29
Tableau V : Coefficients culturaux par décade après semis, en fonction du cycle de développement de différentes variétés de mil (Frère et Popov, 1987).....	33
Tableau VI : Détail sur les tranches d'urée apportées par poquet et par traitement. Essai Doses d'urée x variétés. Agrhymet, 2002 et 2003.....	56
Tableau VII : Détail sur la détermination des tranches d'urée apportées par poquet et par traitement en conditions hydriques pluviales strictes. Essai Doses d'urée x Densités de semis. Agrhymet, 2002 et 2003.	56
Tableau VIII : Détail sur la détermination de la tranche d'urée apportée par poquet et par traitement en conditions d'irrigations complémentaires. Essai Doses d'urée x Densités de semis. Agrhymet, 2002 et 2003.....	56
Tableau IX : Paramètres utilisés dans le calibrage du modèle SARRA-H V3.0.0.0 pour la simulation des composantes du rendement de la variété de mil ZATIB. Bambey, 2004.	77
Tableau X : Utilisation de la texture du sol du CRA pour le calcul de sa réserve utile (RU) en eau, à l'aide du logiciel SoilHydr (<i>adapté de Denis et al., (1984)</i>).....	79
Tableau XI : Apparition des feuilles chez les variétés de mil HKP, ZATIB, et MTDO en fonction de la date de semis. Agrhymet, 2002.....	123
Tableau XII : Durée (jours) des différentes phases phénologiques des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 1^{ère} date de semis et Date 2 = 2^e date de semis</i>). Agrhymet, 2002.....	130
Tableau XIII : Durée (jours) des différentes phases phénologiques des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (<i>Date 1 = 1^{ère} date de semis et Date 2 = 2^e date de semis</i>). Agrhymet 2003.....	130
Tableau XIV : Rendements moyens (kg ha ⁻¹) en grains des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis. Agrhymet, 2002 et 2003.	151
Tableau XV : Poids sec moyen d'un épi et son rendement grains pour les variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis (<i>Pds = poids et moy = moyen</i>). Agrhymet, 2002 et 2003.	151
Tableau XVI : Rendements moyens (kg ha ⁻¹) en paille des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis. Agrhymet, 2002 et 2003.	151
Tableau XVII : Rendements moyens (kg ha ⁻¹) en grains des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la dose d'urée (<i>N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹</i>). Agrhymet, 2002 et 2003.....	154
Tableau XVIII : Rendements moyens (kg ha ⁻¹) en paille des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la dose d'urée (<i>N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹</i>). Agrhymet, 2002 et 2003.	154

Tableau XIX : Rendements en grains et en paille (kg ha^{-1}) de la variété de mil ZATIB en fonction de la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) et de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), dans des conditions hydriques pluviales. Agrhymet, 2002 et 2003.	158
Tableau XX : Rendements moyens (kg ha^{-1}) en grains et paille de la ZATIB en fonction de la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) et de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), en conditions d'irrigations complémentaires. Agrhymet, 2002 et 2003.	158
Tableau XXI : Consommation hydrique, rendement grain et efficacité d'utilisation de l'eau de la variété de mil ZATIB, en fonction de la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) et de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$). Agrhymet, 2002 et 2003.	160
Tableau XXII : Rendements en épis, en grains, en paille et poids de 1000 grains de la variété de mil ZATIB soumise aux effets de 3 régimes hydriques ($ETM = \text{évapotranspiration maximale}$, $S1 = \text{stress pendant la montaison}$ et $S2 = \text{stress pendant l'épiaison}$) associés à 2 densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambe, 2004.	179
Tableau XXIII : Consommation hydrique, rendement grain et efficacité d'utilisation d'eau de la variété de mil ZATIB en fonction de 3 régimes hydriques ($ETM = \text{évapotranspiration maximale}$, $S1 = \text{stress pendant la montaison}$ et $S2 = \text{stress pendant l'épiaison}$) associés à 2 densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), dans des conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambe, 2004.	185
Tableau XXIV : Comparaison entre les rendements grains observés et simulés par le modèle SARRA-H, pour 3 régimes hydriques ($ETM = \text{évapotranspiration maximale}$, $S1 = \text{stress pendant la montaison}$ et $S2 = \text{stress pendant l'épiaison}$) associés à 2 densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) de la variété de mil ZATIB. Bambe, 2004.	194
Tableau XXV : Rendements grains observés et simulés par le modèle SARRA-H en fonction de la densité de semis et de la date de semis, sous des conditions hydriques pluviales strictes et sur un sol modérément fertilisé en urée. Variété de mil ZATIB. Agrhymet, 2002 et 2003.	209
Tableau XXVI : Optimisation (avec ϵ_b) des rendements grains simulés par rapport à ceux observés sous les effets de la densité et de la date de semis, en conditions hydriques pluviales strictes et sur un sol modérément fertilisé en urée. Variété de mil ZATIB. Agrhymet, 2002 et 2003.	216
Tableau XXVII : Ajustement (avec ϵ_b) des rendements grains simulés par rapport à ceux observés sous les effets de la densité, en conditions hydriques pluviales strictes et sur un sol non fertilisé en urée. Variété de mil ZATIB. Agrhymet, 2002 et 2003.	219

INTRODUCTION

Le mil est une plante céréalière largement cultivée dans certains pays du Sahel Ouest africain (Niger, Burkina Faso, Mali et Sénégal) où il constitue la principale alimentation des populations. Cependant, les hauteurs des pluies annuelles recueillies dans ces pays sont souvent mal réparties (dans le temps et dans l'espace) et insuffisantes pour permettre au mil d'achever correctement son cycle (Rosemberg, 1982). Ceci rend les récoltes assez aléatoires, souvent médiocres (400 kg ha^{-1}) voire nulles, à cause de périodes répétitives de sécheresses qui, combinées avec la situation économique extrêmement critique des paysans, entraînent une récurrence de crises alimentaires (disettes et famines).

Face à cette situation, plusieurs études ont été menées et d'énormes efforts déployés dans le cadre de la lutte contre les sécheresses dont les plus fréquentes surviennent surtout vers la fin des cycles culturaux (Traoré et Vaksman, 1990 ; Annerose et Cornaire, 1991 ; Cournac *et al.*, 1993). Des variétés mieux adaptées aux conditions de sécheresse ont été mises au point et vulgarisées (Blum, 1982 ; Mohamed *et al.*, 1988a ; Amoukou et Marchais, 1993 ; Marchais, 1994 ; Sarr *et al.*, 2001). L'influence des facteurs climatiques et édaphiques a été également testée sur les différentes fonctions physiologiques et leur expression dont relèvent des variations interannuelles très importantes des rendements de la culture. Ainsi, différents axes de recherche ont été développés sur la culture du mil et les résultats, aussi fragmentaires qu'ils soient, ont permis aux agriculteurs de cette zone aride de modifier sensiblement leurs pratiques culturales, selon les caractéristiques du milieu de culture. Désormais, ils utilisent largement des variétés précoces et/ou photosensibles, pour accroître leur production et assurer leur sécurité alimentaire.

Cependant, ce but est loin d'être atteint dans ces pays sahéliens où la pression démographique ne fait qu'augmenter au moment où les potentialités de la production agricole s'amoinissent sous l'effet des facteurs de dégradation des terres et de désertification. En effet, la croissance démographique et la sécheresse fragilisent le milieu et conduisent à un appauvrissement extrême des sols (Pieri, 1989). Actuellement, dans tous les pays du Sahel, seules les portions les plus au sud (parfois très peu fertiles) bénéficient encore d'une pluviosité plus ou moins suffisante pour conduire à terme les cycles des variétés de mil de plus de 120 jours.

Comme alternative, les développeurs agricoles ont envisagé d'améliorer la productivité agricole à travers l'intensification des cultures, notamment par l'augmentation de la densité de semis (Coulibaly *et al.*, 1988) et l'apport de fumures organiques et d'engrais chimiques (Traoré, 1988). Cette recommandation a été réitérée par Piraux *et al.*, (1997) qui ont indiqué qu'un développement durable ne peut être atteint qu'avec le maintien de la fertilité des sols, en particulier dans les zones confrontées à l'aridité et à la sécheresse. Cependant, l'essentiel

des travaux effectués dans cette optique a été focalisé sur le comportement du mil face à la sécheresse ou à l'apport de fertilisants (Diouf, 2000). La caractérisation des mécanismes agrophysiologiques pour la création des variétés mieux adaptées à la sécheresse a souvent été effectuée sans tenir compte de l'effet de l'interaction entre la fertilité du sol et les autres pratiques culturales sur les besoins hydriques (Dulure, 1993). Or, un développement agricole qui s'appuie sur l'augmentation de la fertilité des sols et de la densité de semis va nécessairement impliquer l'augmentation des besoins en eau des cultures (Forest, 1991). Cette problématique rend difficile le suivi opérationnel des campagnes agricoles, habituellement exercé par le Centre Régional Agrhymet (CRA), à l'aide d'outils de prévisions des rendements basés sur le bilan hydrique des cultures.

En effet, créé en 1974, le CRA est une Institution spécialisée du Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS). Il regroupe neuf pays membres : Burkina Faso, Cap-Vert, Gambie, Guinée Bissau, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal et Tchad. Avec son siège à Niamey au Niger, le CRA est un établissement public inter-étatique doté d'une personnalité juridique et d'une autonomie financière. Il a pour objectifs de contribuer à la sécurité alimentaire à travers l'augmentation de la production agricole dans les pays membres du CILSS et d'aider à l'amélioration de la gestion des ressources naturelles au Sahel. Pour atteindre ces objectifs, le CRA fournit des informations d'alerte précoce et forme des acteurs de développement dans les domaines de l'agrométéorologie, la climatologie, l'hydrologie, la protection des végétaux, etc. De par sa vocation régionale, le CRA est un centre d'expertise en matière des sciences et techniques applicables aux secteurs du développement agricole, de l'aménagement de l'espace rural et de la gestion des ressources naturelles.

Dans le cadre de ses activités d'information, un des principaux outils utilisé par le CRA est le modèle de simulation du bilan hydrique et de prévision des rendements des cultures : DHC (Diagnostic Hydrique des Cultures). Ce modèle a été développé au centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), France, puis transféré au CRA dans le cadre d'un partenariat établi entre les deux institutions depuis la fin des années 1980. Basé sur le bilan hydrique, le modèle DHC permet de suivre le déroulement de l'hivernage (Forest, 1984 ; Ganzin, 1989) et de fournir des informations en matière de sécurité alimentaire par alerte précoce. Il présente cependant des imperfections qui ont nécessité diverses mises à jour et adaptations aux besoins des utilisateurs. Cependant, jusqu'à la version actuelle (DHC4), le modèle ne permet de prévoir que les rendements du mil (*Pennisetum glaucum* [L.] R.Br.), et ceci uniquement dans la bande sahélienne. En plus, il continue de considérer invariables certaines caractéristiques de la culture telles que la durée des phases phénologiques et les besoins en eau, pour une variété donnée. C'est ainsi que les diverses évaluations dont il a été l'objet ont recommandé l'extension de ses capacités, non

seulement aux situations agroclimatiques réellement rencontrées dans les pays du CILSS, mais aussi à d'autres cultures. Pour cela, outre le CIRAD, le CRA développe et entretient des relations de collaboration avec d'autres institutions, comme le Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS), Sénégal, en vue de mettre au point un modèle de prévision de rendements valable dans toutes les zones de mousson d'Afrique de l'Ouest et prenant désormais en compte les effets, aussi bien des pratiques culturales que du climat, sur la production des cultures annuelles.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail dont l'objet est de caractériser, dans un premier temps, les pratiques agricoles du mil existantes au Sahel (date et densité de semis, dose de fertilisation azotée, différence variétale) et de réunir les données nécessaires à l'évaluation de leurs impacts sur l'évolution du couvert de la culture du mil, dans des conditions hydriques contrôlées et non contrôlées. Dans un deuxième temps, les résultats obtenus seront confrontés à ceux simulés par le modèle SARRA-H (Système d'Analyse Régional des Risques Agroclimatiques, avec H = habillé), afin d'adapter les algorithmes de calcul de ce modèle et élargir ses performances aux situations agroclimatiques contrastées dans lesquelles le mil est généralement cultivé. Le modèle SARRA-H, une fois paramétré avec ces résultats expérimentaux, sera testé avec des données complémentaires et utilisé en lieu et place de DHC au CRA, pour le suivi des cultures et la prévision de leurs rendements en Afrique de l'Ouest.

Le travail effectué est présenté en quatre parties dans ce document. La première partie est consacrée à l'introduction et aux généralités sur la culture du mil et les facteurs de variations de ses rendements, la deuxième explique la méthodologie appliquée pour les expérimentations, la troisième présente les différents résultats obtenus et les discussions et la quatrième est réservée à la conclusion et aux perspectives.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

Chapitre 1 : Caractéristiques économiques et bio-physiologiques du mil

1.1. Importance économique

Le mil est une plante céréalière cultivée surtout pour son grain qui est essentiellement utilisé à 80-90 % pour l'alimentation humaine au Sahel (Ben Mohamed *et al.* 2002). Ses sous-produits, telles que les tiges et les feuilles, sont des aliments appréciés par le bétail et servant aussi à divers usages domestiques (construction des cases, hangars et greniers, confection des palissades et lits, fabrication du fumier et du compost, etc.) en milieu rural. C'est une culture annuelle largement cultivée, en culture pure ou en association avec d'autres cultures comme le niébé et le sésame, dans la partie Nord-Ouest de l'Inde et dans la zone sahélienne ouest africaine (Craufurd et Bidinger, 1988).

Par le volume de sa production et les surfaces cultivées, le mil est l'une des plus importantes céréales (riz, maïs, sorgho et mil) cultivées sous les tropics ("The Syngenta Foundation for Sustainable Agriculture" ou Fondation Syngenta pour l'agriculture durable, 2006). Environ 95 % des surfaces cultivées se trouvent dans les pays en développement à faible pluviométrie. Dans la frange sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, il est surtout cultivé au Niger, au Burkina Faso, au Mali et au Sénégal, où il constitue la principale alimentation des populations. Au Niger, les emblavures du mil occupent à elles seules 3,2 millions d'hectares, soit 53 % des surfaces cultivées et représentent 75 % de la production céréalière du pays (Ben Mohamed *et al.*, 2002). Pendant la campagne agricole 2002, le Niger a produit 2 570 401 tonnes de mil, contre 2 744 908 tonnes en 2003, 2 037 714 tonnes en 2004 et 2 652 391 tonnes en 2005 (conf. la Direction des Statistiques du Ministère du Développement Agricole du Niger).

Produisant bien entre les isohyètes 200 et 300 mm (Begué, 1991), le mil dispose d'un meilleur potentiel de production par rapport aux autres céréales, lorsque les conditions de culture ne sont pas favorables. Ses rendements en biomasse et en grains sont généralement plus élevés que ceux du sorgho en conditions d'alimentation hydriques limitantes (Mason, 2001). Jusqu'à 600 mm de pluviométrie saisonnière, les variétés hâtives de mil dominent largement les emblavures de sorgho. A partir de 600 à 1000 mm, c'est le sorgho et le mil tardif qui prennent le relais (Virmani et Sivakumar, 1984 ; Begué, 1991).

Les rendements du mil sont cependant affectés par le manque d'eau, tout comme les pluviométries très élevées qui favorisent l'apparition de maladies et parasites (Vuong et Selvaraj, 1988). Ils sont aussi très dépendants de la grande variabilité des conditions

climatiques sahéliennes, notamment des pluies insuffisantes et généralement mal réparties dans le temps et dans l'espace (Sivakumar *et al.*, 1992). En effet, dans la plupart des localités du Sahel, les hauteurs des pluies annuelles recueillies sont généralement insuffisantes pour permettre aux cultures de réaliser correctement leurs cycles de développement (Rosemberg, 1982). Ceci rend les récoltes assez aléatoires, souvent médiocres (400 kg ha⁻¹) voire nulles, à cause de périodes répétitives de sécheresses entraînant une récurrence de crises alimentaires. Cette situation, souvent catastrophique, accélère la paupérisation et réduit considérablement l'espérance de vie des populations rurales, dont la principale source de revenus est l'agriculture et l'élevage.

1.2. Origine et systématique

Le mil est une plante diploïde avec $2n = 14$ chromosomes (Diouf, 2000). C'est une Monocotylédone de la famille des *Poacées*, sous-famille des *Panicacées*, tribu des *Panicées*, genre *Pennisetum*, qui comporte plusieurs espèces : *Pennisetum americanum* [L.] Leeke, *Pennisetum glaucum* [L.] R.Br., *Pennisetum spicatum*, *Pennisetum typhoides* Staph et Hubbard (Anonyme, 1993). Le mot mil vient de milium (ou mille grains) qui désigne une plante qui a des épis à grand nombre de grains (Boubacar, 1985). Il serait originaire d'Afrique de l'Ouest où l'on rencontre les diverses formes cultivées et sauvages (Diouf, 2000). Il est économiquement le plus important de l'ensemble formé par les 14 céréales dites mineures des millets dont il fait partie (Amadou, 1994).

1.3. Caractéristiques botaniques et biologiques

Le mil est une graminée à port érigé dont la tige, sans lacunes médullaires, a une taille qui varie de 50 à 400, voire 500 cm, selon les variétés (Rachie et Majmoudar, 1980 ; Anonyme, 1993 ; Diop, 1999). Cependant, dans la zone semi-aride, la hauteur de la tige ne dépasse pas 300 à 380 cm, et possède un diamètre de 1 à 2 cm (Zongo *et al.*, 1988 ; Amadou, 1994).

La tige du mil a une couleur verte plus ou moins foncée selon la variété et porte des nœuds au niveau desquels s'insèrent de longues feuilles alternes engainantes. Le limbe de la feuille du mil est lancéolé, glabre ou poilu et présente des nervures longitudinales et parallèles (figure 1). Les feuilles sont vertes, mais parfois colorées en rouge. Elles portent des stomates distribués sur les deux faces (Hector, 1936 ; Cobley, 1965 ; Purcegllove, 1972 ; Anonyme, 1993 et Diop, 1999).

Le mil présente un haut pouvoir de ramification ou tallage à la base. Son enracinement, du type fasciculaire, est caractérisé par l'apparition de racines adventives sur les nœuds de la base, dès la 3^e semaine du cycle végétatif (Santens, 1979 ; Chopart, 1980 ; Amadou, 1994).

Le système racinaire est composé de racines superficielles et des racines qui peuvent s'enfoncer jusqu'à 200 cm dans le sol, ce qui explique l'adaptation de cette plante aux sols dunaires (Boubacar, 1985 ; Sivakumar et Salaam, 1994).

L'inflorescence est une panicule très dense et cylindrique, en position terminale, de forme et de longueur variable. Elle mesure entre 15 et 140 cm de long, selon les variétés, avec un diamètre d'environ 4 cm (Anonyme, 1993 ; Diop, 1999). Les épillets, enveloppés de deux bractées courtes et membraneuses ou glumes (Santens, 1979), sont formés de deux types de fleurs enveloppées par deux glumelles : des fleurs supérieures mâles ou stériles avec des anthères médifixes et des fleurs inférieures fertiles dites hermaphrodites qui comportent un ovaire et 3 étamines (Boubacar, 1985). Chaque étamine se compose d'un long filet et d'une anthère oscillante dont le sommet est garni d'une touffe de poils ou pénicille, d'où le nom de pénicillaire attribué à la plante (Santens, 1979). Chez le mil, la floraison est protogyne, les fleurs femelles s'épanouissent avant les fleurs mâles ; ce qui détermine une fécondation croisée ou par allogamie. Cependant, Diop (1999) indique que la floraison peut être simultanée chez certaines variétés.

Le fruit du mil (grain) est un caryopse nu de forme elliptique ou piriforme, de couleur variable en fonction des écotypes. Zangré et Balma (1992) ont défini 4 couleurs différentes de grains de mil, dans une collection de 110 échantillons étudiés (jaunes, gris, gris-jaunes et pourpres) ; Ils peuvent aussi avoir une couleur jaune fauve ou brunâtre selon la variété. Le grain du mil a 4 mm environ de long et une masse de 3 à 15 mg à maturité (Siband, 1981 ; Santens, 1985 ; Boubacar, 1985 ; Amadou *et al.*, 1994). Chaque inflorescence produit 1000 à 4000 grains (Diop, 1999). Selon Hulse *et al.*, (1980), la composition moyenne des grains du mil comprend : 12,1 % de protéines, 15,0 % de lipides, 69,4 % de glucides, 2,4 % de fibres, 2,3 % cendres et leur valeur nutritive est pareille à celle du riz et du blé.



Figure 1 : Plants de mil au stade épiaison

1.4. Physiologie de la croissance et du développement

Le mil est une graminée rustique adaptée aux régions sahéliennes (Eldin, 1991). Son cycle de développement dont la durée varie en zone sahélienne de 75 à 120 jours selon la variété et la zone de culture (Zangré et Balma, 1992), comporte 3 phases successives au cours desquelles l'aspect morphologique du pied se modifie considérablement : la phase végétative, la phase reproductrice et la phase de maturation.

La phase végétative débute avec la germination des graines et s'achève par l'initiation florale. La germination est hypogée et dure 24 h si elle a lieu dans de bonnes conditions (Anonyme, 1993). Elle est suivie de l'apparition des premières feuilles (levée) pendant 3 à 5 jours, puis d'une phase de croissance qui comporte le tallage (multiplication de tiges latérales) et la montaison. Ainsi, après la levée, la croissance du mil comprend 3 phases : une phase lente (tallage) en début de cycle jusqu'au 53^e jour après semis (JAS), une phase accélérée (montaison) entre le 53^e et le 73^e JAS et une phase de stabilisation pendant la période reproductrice (Amadou, 1994).

Pendant le tallage, le mil émet des bourgeons latéraux ou talles qui commencent à émerger vers le 10^e jour après la levée, lorsque les 5 à 7 premières feuilles du brin maître sont apparues (Siband, 1981 ; Lambert, 1983 ; Amadou, 1994 ; Diouf, 2000). Les talles primaires apparaissent sur les nœuds de la base du brin maître. Un tallage secondaire peut démarrer 7 jours environ après le début du tallage primaire, aux aisselles des premières feuilles des talles primaires. Selon Amadou (1994), l'émission des talles et des feuilles se fait progressivement dans le temps jusqu'aux environs du 65^e jour après semis (JAS). Un pied peut émettre 16 à 17 talles et une talle peut porter 10 à 11 feuilles vivantes. D'après Anonyme (1993), le tallage dure environ 20 jours et les talles produites tardivement après ce délai, n'émettront pas d'épis ou n'arriveront pas à maturité. La durée et le rythme de la multiplication des talles sont indépendants de la durée du cycle de développement de la plante. Cependant, le nombre total des talles émises est d'autant plus élevé que le cycle de la variété est long, tant que l'alimentation hydrique de la plante n'est pas un facteur limitant (Siband, 1981 ; Amadou et Fussel, 1987 ; Amadou, 1994). Chez les variétés tardives, chaque pied peut avoir jusqu'à 40 talles dans des bonnes conditions agronomiques (Diop, 1999). L'augmentation du rendement en paille qui en découle, est par conséquent fonction de la durée du cycle de la plante (Dancette, 1989). Après le 65^e JAS, on assiste à la réduction du nombre de talles par dessèchement des plus jeunes. Vers la fin du cycle, le nombre de talles se stabilise à environ 1 à 7 (Zangré et Balma, 1992) ou seulement 6 talles fertiles par poquet (Amadou, 1994).

D'après Siband, (1983), cette aptitude qu'a le mil de bloquer les jeunes talles en faveur des plus âgées serait à la base de sa rusticité. La multiplication et l'allongement simultanés des

talles et des feuilles, en début de cycle, traduisent l'augmentation accélérée de l'indice de surface foliaire ou LAI (Leaf Area Index) de cette culture. Après cette phase de développement rapide, le LAI devient constant pendant la montaison puis décline vers la fin du cycle (Amadou, 1994). Cette réduction du LAI s'explique par l'assèchement progressif des feuilles plus âgées d'une part et par l'élimination des jeunes talles d'autre part. La surface foliaire est liée au taux d'apparition des feuilles, à la durée et au taux de leur expansion (Mohamed *et al.*, 1988a). Chez le mil, elle est maximale au moment de l'apparition de la panicule (Anonyme, 1993) et les feuilles qui contribuent le plus à la croissance totale de la culture sont celles de la couche supérieure.

La montaison correspond à l'allongement des entre-nœuds des tiges. Elle se déroule pendant la phase de tallage pour les mils précoces et après la fin tallage pour les mils tardifs. Elle varie chez le mil en fonction de la fertilité du sol (Labo, 1992), de la variété (Amadou, 1994 ; Diop, 1999), de la date de semis et du nombre d'entre-nœuds (Zangré et Balma, 1992).

La phase de reproduction se caractérise par la différenciation de l'épi. Elle comprend l'initiation florale, l'épiaison, la floraison femelle et, 2 à 3 jours plus tard, la floraison mâle (inflorescence entièrement couverte d'étamines).

La phase de maturation ou de remplissage des grains passe d'abord par les stades de grains laiteux, puis de grains cireux avant d'être complète lorsque les grains deviennent secs et durs. Ce stade est atteint 25 à 55 jours après la fécondation (Santens, 1985 ; Amadou, 1994) et se caractérise par l'apparition d'un point noir dans la région du hile du grain.

Diop (1999) a estimé les durées moyennes des phases phénologiques des variétés hâtives et tardives de mil (tableau I), tout en soulignant la variabilité de la durée de ces phases en fonction des conditions climatiques.

La croissance racinaire dépend, quant à elle, du type de sol. Selon Chopart (1980) cité par Diouf (2000), la racine peut atteindre une longueur de 10 cm, trois jours après levée, sur un sol sableux. Les racines adventives commencent à s'initier vers le dixième jour après levée. Les racines secondaires quant à elles, apparaissent vers le quinzième jour après levée et leur formation se poursuit jusqu'à 60 jours après levée (Chopart, 1983). Le front racinaire progresse à raison de 2 cm par jour jusqu'au début du tallage, puis de 3,5 cm entre ce stade et le début de l'épiaison (Diouf, 2000). Après la floraison, la croissance racinaire ralentit et, à la récolte, la profondeur du front se limite en moyenne à 180 cm avec une exploration latérale allant jusqu'à 300 cm du pied, sur un sol sableux (Chopart, 1983).

Tableau I : Durée moyenne, en jours, des phases du cycle végétatif du mil (DIOP, 1999)

Phases phénologiques	Variétés hâtives (<i>souna</i>)	Variétés tardives (<i>sanio</i>)
Germination / Levée	10 à 15	15 à 20
Tallage / Montaison	20 à 25	30 à 35
Epiaison / Floraison	30 à 35	40 à 45
Maturation	15 à 20	15 à 20

Chapitre 2 : Exigences pédoclimatiques du mil

2.1. Sol

Les sols recommandés pour la culture du mil sont généralement à texture grossière. Ils doivent être légers, sableux (surtout dunaires sans forte proportion d'argile), de fertilité moyenne, d'un bon drainage et d'un pH acide (Santens, 1976 ; Maïdoukia, 1980 ; Sivakumar, 1986 ; Amadou, 1994). Dans le Sahel, le mil est cultivé généralement sur des sols sableux profonds, rouges (sols ferrugineux tropicaux peu lessivés), contenant plus de 65 % de sable et moins de 18 % d'argile (Swindale, 1982). Ces sols sont perméables et permettent une bonne prospection des racines à la recherche de l'eau dont ils facilitent l'infiltration. Il existe aussi d'autres contraintes édaphiques qui limitent la disponibilité de l'eau pour la plante. Il peut par exemple exister dans le sol des parasites animaux ou de plantes nuisibles, des horizons de toxicité ou d'acidité et des niveaux de fertilité chimique qui peuvent influencer la consommation en eau de la plante (Roger, 1984).

Pour ce qui est des sols sableux du Niger, ils sont pauvres en phosphore et en azote (Denis *et al.*, 1984). Selon ces auteurs, ils contiennent souvent moins de 0,25 % de matière organique et leurs capacités d'échanges cationiques sont très faibles. Ceci amène les cultures non fertilisées à développer le plus souvent des symptômes de carence dans au moins un de ces éléments minéraux. Toutefois, les symptômes de carence ne sont pas seulement provoqués par l'absence d'un élément minéral dans le sol. Ils peuvent aussi apparaître dans des conditions, rendant inutilisable par la plante l'élément considéré, comme :

- une forte rétention de l'élément par le sol (cas de potassium rétrogradé dans certaines argiles ou aussi d'oligo-éléments retenus par la matière organique du sol) ;
- une solubilité réduite de l'élément par des pH très élevés du sol ;
- un déséquilibre entraîné par l'excédent d'un élément qui provoque le déficit d'absorption d'un autre élément (carence par interaction).

2.2. Lumière

Le mil est une plante héliophile (qui exige l'éclairement solaire direct) chez laquelle la lumière joue un rôle déterminant, aussi bien dans les processus morphogénétiques de sa croissance que sur le déterminisme de sa floraison. En effet, la durée de l'insolation ou photopériode constitue une véritable source de variabilité de la date de floraison des variétés sensibles (Alagarwamy *et al.*, 1998). Douze (12) heures par jour de forte intensité lumineuse sont nécessaires à l'accomplissement des processus photosynthétiques pour un bon développement du mil (Maïdoukia, 1980). La photosynthèse dépend de la réponse

photosynthétique de chaque feuille et de la répartition de l'énergie solaire à l'intérieur du couvert végétal (McPherson et Slatyer, 1973 ; Pearson et Derrick, 1977 ; Pearson, 1984). En effet, les radiations solaires sont la source d'énergie la plus importante dans les processus de la photosynthèse, de la photorespiration et de l'évapotranspiration par le chauffage du complexe sol – atmosphère qu'elles provoquent (Rijks, 1971 ; Begué, 1991 ; Anonyme, 1993). L'efficacité photosynthétique dépend également du génotype (Mohamed *et al.*, 1988b), de l'âge des feuilles, de leur degré d'exposition au soleil, des maladies et des déficiences minérales et hydriques (Kaul et Growle, 1974 ; Begué, 1991).

2.2.1. Accumulation et répartition des assimilats

Chez le mil, les produits de la photosynthèse migrent des feuilles vers la tige et les racines pendant la phase végétative. Cependant, pendant les 15 à 20 premiers jours après la fécondation des fleurs, le flux est dérivé vers la panicule pour permettre le remplissage des grains. L'expédition de ces produits vers les grains est assurée exclusivement par les dernières feuilles produites (Anonyme, 1993). La surface de la dernière feuille représente seulement 5 % de la surface totale des feuilles de la plante, mais contribue pour 32 % au poids des grains, à cause non seulement de son jeune âge, de sa proximité avec la panicule, mais aussi de sa position favorable à l'interception de la lumière (Egharevba, 1981). De par son caractère de « plante en C4 », le mil a une capacité de fixation de CO₂ importante qui lui permet d'économiser l'eau en fermant ses stomates, en cas de déficit hydrique, ce qui explique son adaptation aux régions semi-arides.

2.2.2. Bilan radiatif

La radiation interceptée est un élément essentiel dont dépend la photosynthèse de la plante. A l'échelle du couvert, la répartition du rayonnement lumineux dans la masse foliaire fait intervenir le profil de la densité de surface foliaire et l'architecture de la végétation définie par l'inclinaison des feuilles et la densité de semis (Begué, 1991). Le bilan radiatif au niveau de la surface terrestre, peut s'obtenir par l'équation suivante (Anonyme, 1993) :

$$R_n = R_g (1-\alpha) + R_L \downarrow + R_L \uparrow$$

Avec : R_n ($w.m^{-2}$) = la radiation solaire nette, α = albédo, R_g ($w.m^{-2}$) = la radiation globale dans le spectre du visible et de l'infrarouge proche (0,4 à 1,1 μm), $R_L \downarrow$ = la radiation à ondes longues (3 à 100 μm) qui arrive à l'atmosphère et $R_L \uparrow$ = la radiation à ondes longues (3 à 100 μm) émise par la surface terrestre.

La radiation globale correspond à la somme de la fraction du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffusé par l'atmosphère. Au niveau du sol, il réfléchit avec un coefficient de réflexion (albédo) qui caractérise les propriétés optiques de la surface réceptrice et dépend de l'angle zénithal solaire (Amadou, 1994). Selon cet auteur, les stations météorologiques qui

font des mesures directes de la radiation globale ne sont pas nombreuses dans les régions du Sahel, mais le rayonnement solaire global intervenant comme l'unique source d'énergie externe, peut se mesurer à l'aide d'un pyrranomètre ou se calculer par la formule d'Angström à partir d'une fraction d'insolation (Begué, 1991 ; Allen *et al.*, 1998):

$$R_g = R_{go} (a + b * n / N)$$

Avec : R_{go} ($W.m^{-2}$) = la radiation extraterrestre, n (h) = l'insolation journalière, N (h) = la longueur théorique du jour, a et $(a + b)$ sont les coefficients d'Angstrom qui expriment respectivement : la fraction de la R_{go} transmise par un ciel entièrement couvert ($n = 0$) et par un ciel dégagé ($n = N$).

a et b sont des coefficients empiriques liés à la localité et à la période considérée qui doivent donc être déterminés avec soin (Anonyme, 1993). Leur valeur, généralement voisine de 0,25 (a) et 0,50 (b), peut varier, mais leur somme doit nécessairement être égale à 0,75 (Allen *et al.*, 1998). Pour le mil (cv. ex-Bornu), Kassam et Kowal (1975) ont déterminé, au Nigeria, le bilan radiatif moyen journalier relatif à tout le cycle de croissance de la culture comme suit :

R_g (mesuré) = 430 $W m^{-2}$, R_g (calculé) = 397 $W m^{-2}$, R_n = 267 $W m^{-2}$ pour un albédo = 0,19 et R_L = - 87 ; avec $R_n / R_g = 0,62$.

Dans le visible, une fraction du rayonnement global est captée par la biomasse verte de la culture pour être utilisée par la photosynthèse, c'est le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). Selon Amadou (1994) le rapport entre le PAR réfléchi par un couvert végétal et le PAR incident donne un coefficient de réflexion dans le visible qui est un excellent indicateur de l'activité physiologique de ce couvert végétal. Anonyme (1993) propose l'utilisation du PAR, en situation de conditions optimales d'approvisionnement en eau et en éléments nutritifs, pour évaluer la croissance du mil en termes de quantité de radiation interceptée à l'aide de l'équation suivante :

$$Biomtot = PAR_a * E_c * t$$

Avec : $Biomtot$ = Biomasse totale ($g m^{-2}$), PAR_a = Radiation photosynthétique active absorbée, E_c = Efficacité de conversion de la radiation absorbée (PAR_a) en biomasse sèche ($g MJ^{-1}$), t = temps.

L'efficacité de conversion (E_c), appelée ϵ_b (epsilon B) dans d'autres littératures (Birch, 1990 ; Anonyme, 2002 ; Sultan 2002,), se définit par la pente de la relation linéaire entre la biomasse sèche accumulée et l'énergie absorbée ou interceptée en conditions de croissance optimale. La surface foliaire représentée par le LAI, peut ainsi largement entrer dans le déterminisme de l'insolation interceptée (Squire *et al.*, 1987). Des essais réalisés par les auteurs inscrits dans le tableau II ont permis de déterminer certaines valeurs d'efficacité de conversion de la radiation absorbée (E_{ca}) par le mil.

Tableau II : Efficacité de conversion de la radiation absorbée (E_{ca}), chez le mil (*Anonyme, 1993*)

ESSAIS	E_{ca} (g MJ⁻¹ PAR_a)
Reddy and Willey, (1981)	2,5
Marshall and Willey, (1983)	2,3
Squire <i>et al.</i> , (1984)	2,6
Craufurd et Bidinger, (1988)	1,9 et 2,4
Begue <i>et al.</i> , (1991)	3,1 [2,9 E_{ci}]

Chez le mil, cette efficacité de conversion n'est influencée ni par la durée du jour (Monteith *et al.*, 1989), ni par la densité de la culture (Dancette, 1978 ; Azam-Ali *et al.*, 1984), ni par la température pour des valeurs supérieures à 21,5 °C. Cependant, elle est liée à la durée du cycle de développement (Squire *et al.* 1984). Par contre, l'augmentation de la résistance stomatique provoquée par un déficit de saturation en eau de l'atmosphère et un stress hydrique du sol sont des facteurs qui peuvent faire baisser l'efficacité de la transformation de la radiation absorbée et le taux de transpiration de la culture, donc sa conductance stomatique (Ong et Monteith, 1984 ; Munro, 1989).

La région du spectre du PAR des plantes est comprise entre 400 et 700 nm pour la communauté scientifique européenne et américaine, mais les scientifiques de l'ex-URSS et des pays satellites la situent entre 380 et 710 nm (Begué, 1991; Anonyme, 1993). Les méthodes de mesure du PAR peuvent varier d'une étude à l'autre selon les capteurs utilisés (pyranomètre avec filtre proche infrarouge à la cellule « quantum sensor »). Mais, la quantité du PAR absorbée peut se calculer par la formule :

$$\mathbf{PAR_a = R_g * E_s * E_a \text{ (Anonyme, 1993)}}$$

Avec: E_s (efficacité climatique) = rapport entre le PAR et la radiation totale et E_a (efficacité d'absorption) = rapport entre le PAR_a et le PAR incident.

L'efficacité climatique (E_s), comprise entre 0,4 et 0,5 dans les zones arides, est partiellement liée aux conditions atmosphériques, en terme de pression de vapeur. Begué *et al.* (1991) ont enregistré, dans un essai conduit pendant la saison des pluies à Niamey, une E_s constante égale à 0,47. Selon Buerkert *et al.* (1994), la fraction de la radiation interceptée par la culture est fonction de la durée du cycle, du LAI et de la configuration des feuilles (orientation, inclinaison et réflectance). Monteith (1972), suggère qu'elle puisse être mise en corrélation avec le LAI, au moyen d'un coefficient d'extinction de la radiation (K), pour des cultures homogènes qui couvrent totalement et uniformément le sol suivant la formule ci après :

$$\mathbf{E_a = a [1 - \exp (-k * LAI)]}$$

Avec : a est la valeur asymptotique de E_a .

Pour des plantes éparses comme le mil et lorsque les valeurs de k et du LAI sont faibles, la fraction de la radiation interceptée est directement proportionnelle au LAI. D'où l'équation ci-dessus se résume d'après Anonyme (1993) à :

$$\mathbf{E_a = k * LAI}$$

Le coefficient (k) dépend des facteurs externes (l'angle zénithal solaire, la radiation diffuse et les propriétés optiques du sol), des propriétés optiques des feuilles et de l'architecture de la culture.

En termes de bilan énergétique, la lumière solaire ne constitue pas un facteur limitant pour le développement des cultures au sahel. Cependant, de par les variations de sa durée journalière et de son intensité, elle a un impact très important sur le bilan hydrique cultural dans cette zone à faible pluviosité (Koné, 1990). En effet, du fait qu'elle intervient dans les processus de consommation hydrique, de transformations métaboliques et du transfert des métabolites vers les organes ou cellules cibles, la lumière solaire est inévitablement exigée par les plantes vertes pour assurer leur développement, mais à des degrés différents selon les espèces et les variétés. C'est ainsi que les variétés de mil ont développé des comportements distinctifs d'adaptation vis-à-vis des changements quantitatifs et qualitatifs de l'énergie lumineuse qu'elles reçoivent, en fonction du climat (Craufurd et Qi, 2001). Ces variétés arrivent à conditionner et à harmoniser leur croissance avec ces changements périodiques d'ordre climatique pour terminer leur cycle juste vers la fin de la saison pluvieuse.

2.2.3. Photopériodisme

Le photopériodisme a été mis en évidence en Amérique par Garner et Allard en 1920 (Franquin, 1971). Il se traduit par l'influence de la durée du jour ou photopériode sur les processus de croissance et de développement des plantes. Il s'agit d'un phénomène qui met en jeu l'ensemble de réactions déclenchées par les variations annuelles de l'alternance jour – nuit dans les organismes végétaux, pour la mise à fleur des variétés photosensibles. L'étude des mécanismes mis en jeu dans le photopériodisme a permis de mieux comprendre les exigences qui concourent à la réalisation de l'induction florale chez les plantes dites de jours courts comme le mil et les plantes de jours longs. Ainsi, la durée de la photopériode est déterminante dans la mise à fleur des plantes. On distingue trois types de comportements végétaux vis-à-vis de la photopériode :

- les variétés insensibles, dont la floraison a lieu quelle que soit la photophase, pourvu que celle-ci soit longue pour permettre une photosynthèse suffisante ;
- les variétés dites de jours courts qui ne peuvent fleurir que si la longueur du jour est inférieure à une certaine valeur de la photophase (dite photophase critique) ;
- les variétés dites de jours longs qui ne fleurissent que quand la longueur du jour est supérieure à la photophase critique.

Le nombre d'heures, pouvant être considéré comme seuil de photophase critique, varie en fonction des espèces, voire des cultivars, et évolue en fonction de l'âge de la plante (Thomas et Vice-Prue, 1997). Carberry et Campbell (1985) ont signalé un effet facultatif de jour court sur la croissance du mil qui fleurit plus précocement quand les jours sont courts que lorsqu'ils sont longs. Dans le même sens, Begg et Burton (1971) ont montré que la durée de la phase de

développement comprise entre le semis et l'initiation paniculaire est en relation avec la durée de l'éclairement solaire journalier.

2.2.4. Relation date de semis - photopériodisme

La durée du cycle des variétés locales de mil et de sorgho d'Afrique de l'Ouest varie fortement avec la date de semis. En effet, le retard de semis raccourcit la phase végétative de ces plantes, du fait de leur floraison qui est déclenchée par la diminution de la durée du jour (Franquin, 1987 ; Traoré *et al.*, 1995 ; Vaksman *et al.*, 1996). Ceci entraîne leur adaptation à la très grande instabilité du début et de la fin de la saison des pluies en zone soudano-sahélienne (Cochemé et Franquin, 1967 ; Franquin, 1987 ; Craufurd et Bidinger, 1988 ; Traoré *et al.*, 2000b). Cette adaptation dépend du patrimoine génétique de la culture et parfois des facteurs écologiques (Mohsen *et al.*, 1999).

Les variétés de jours courts semées en mai et juin, lorsque les jours sont longs, restent à l'état végétatif en attendant que la durée du jour soit réduite à une photopériode inductive, ce qui rallonge leur cycle. Lorsque les semis sont réalisés en août, sous des photopériodes courtes, la durée de la phase végétative des plantes est minimale et la valeur représente la « précocité intrinsèque » de la variété (Traoré, 2001). Des observations sur l'initiation paniculaire, réalisées sur le sorgho au Nigeria (Kassam et Andrews, 1975) et au Mali (Traoré *et al.*, 1995) ont montré que l'intervalle entre la levée et ce stade critique de développement diminue avec le retard de semis. Vaksman *et al.* (1996), indiquent que la durée de la phase végétative s'accroît lorsque la photopériode augmente et que la durée du cycle des sorghos d'Afrique soudano-sahélienne peut varier en fonction de la date de semis, pour une même variété de 90 à 190 jours. Ces mêmes auteurs indiquent par ailleurs qu'un décalage de semis de 15 jours, vers fin mars (en contre saison), peut retarder la floraison de plusieurs mois. En outre, Kouressy *et al.* (1998) ont également trouvé qu'une augmentation de la photopériode de trente minutes peut provoquer l'allongement de la durée du cycle du mil de plus de trois mois. Selon ces auteurs, le nombre de feuilles développées et la biomasse produite varient aussi dans le même sens et entraînent une augmentation significative de la biomasse totale à la récolte, due non pas à un rendement en grains, mais en paille (Bacci *et al.*, 1998).

Ainsi, les variétés céréalières identifiées comme étant adaptées aux conditions du climat semi-aride doivent cette adaptation à leur précocité, souvent induite par le photopériodisme. Cependant, les réactions photopériodiques ne sont pas seules à avoir des répercussions sur les phénomènes physiologiques de la croissance et du développement de la plante. Elles sont naturellement associées à d'autres phénomènes comme les effets des variations thermiques.

2.3. Température

Les températures moyennes exigées par le mil sont de l'ordre de 30 °C, mais elles varient en fonction de la variété et des différentes phases phénologiques du cycle de développement. Santens (1985) a déterminé une somme de températures moyennes journalières de 2800 °C pour un cycle de 100 jours. Selon Maïdoukia (1980) et Diop, (1999), la température minimale de germination est de 10 à 12 °C, l'optimum requis pour une bonne croissance de la plante se situe entre 33 et 35 °C et le maximum entre 45 et 50 °C. Selon Anonyme (1993), le mil requiert des valeurs de température variant entre 22 et 36 °C pour une meilleure réponse de la photosynthèse qui est optimale entre 31 et 35 °C. En général, des températures plus basses que l'optimum inhibent la croissance, tout comme celles plus élevées. Les valeurs maximale et minimale de la température journalière sont ainsi déterminantes dans la définition du facteur de réduction de la photosynthèse, influencé par les températures non optimales (Ong et Squire, 1984 ; Bacci, 1994).

La zone sahélienne est généralement soumise à des températures supra optimales à cause du rayonnement solaire intense et à la pluviosité faible qui la caractérisent (Lawson et Sivakumar, 1991). Ainsi, Sivakumar (1986) a trouvé que, sur 64 stations de la zone soudano-sahélienne, la température maximale de l'air varie entre 28 et 42 °C pendant la saison culturale. Pour une même heure donnée de la journée, les régimes thermiques de l'air et de la surface du sol varient d'une période de la saison à une autre et d'un jour à l'autre selon le taux d'humidité relative et l'intensité de la radiation perçue. Après une pluie en juin sur les sols sableux du Niger, l'on a relevé des valeurs de températures de la surface (2 m²) allant de 45 à 50 °C (ICRISAT, 1985 et 1986). Ainsi, outre le facteur hydrique, les températures non optimales sont aussi à l'origine de la baisse de la production des cultures dans le Sahel. Elles réduisent en effet, la production de la biomasse potentielle obtenue à partir de la quantité de radiation interceptée.

Cantini (1995) a montré que les taux d'apparition et d'expansion des feuilles dépendent positivement de la température, souvent indépendamment même de la photopériode. Selon cet auteur, le LAI augmente de façon presque linéaire avec la température, mais dans la fourchette de l'optimum. Si la température baisse, le volume du feuillage de la plante est soumis à une croissance très largement ralentie pendant une longue période et intercepte donc peu de radiation (Squire *et al.*, 1987).

La température ou l'énergie solaire radiante est la source calorifique permettant la vaporisation de l'eau contenue dans le système sol - plante. Toute augmentation de la température autour d'un végétal ne fera qu'accroître le déficit de saturation en vapeur d'eau de l'atmosphère, ce qui occasionne une transpiration intense (Paul, 1981). De telles situations

entraînent la dégradation des enzymes et par conséquent limitent la photosynthèse et la croissance de la plante (Sivakumar, 1993).

En cas de déficit hydrique prolongé, il y a une réduction de la transpiration, accompagnée généralement d'une augmentation de la température foliaire (Idso *et al.*, 1981 ; Hatfield, 1990 cités par Traoré, 1999 ; Denden et Lemeur, 1999) qui est un indicateur, non seulement d'un stress thermique, mais aussi d'un stress hydrique (Traoré, 1999). Le régime thermique autour de la plante dépend de l'aération du milieu. Selon Paul (1981), les vents par leur vitesse, permettent une diffusion plus aisée des molécules d'eau vaporisée et entraînent une perturbation de l'atmosphère autour de la plante qui transpire. Ils contribuent à augmenter la demande évaporative et le stress hydrique des cultures (Lawson et Sivakumar, 1991).

2.4. Interférence photopériodisme - thermopériodisme

La température interfère avec la photopériode selon deux modalités : sommation de températures ou températures accumulées et le thermopériodisme ou oscillations des températures diurnes et nocturnes (Franquin, 1971). Pour toutes les plantes, il existe un optimum thermique favorable à son développement pour un meilleur rendement. En effet, la température et la radiation solaire n'interviennent pas seulement comme des sources énergétiques banales, mais aussi comme des stimuli spécifiques qui déclenchent l'arrêt ou la reprise de la croissance et le déroulement de certains processus de développement chez la plante.

La concordance entre rythmes endogènes et externes journaliers et saisonniers est régulée par des mécanismes délicats qui trouvent leur expression la plus parfaite dans le calendrier de la mise à fleur. En effet, l'intervention de la température dans le phénomène de la vernalisation puis de la lumière dans le photopériodisme, entraîne des changements qualitatifs brusques marquant les différentes phases phénologiques et la mise à fleur de la plante. La plante passerait d'abord par une thermophase où elle serait sensible à la température. Une fois ses exigences satisfaites sur ce point, elle entrerait dans une photophase durant laquelle certaines conditions relatives à la lumière devraient être réalisées. Cependant, Franquin (1971), indique que la réaction thermopériodique n'est qu'un phénomène secondaire à la réaction photopériodique et, la floraison d'une variété photosensible sera d'autant plus précoce et vigoureuse que la nuit est plus longue et que le nombre de cycles « jour court - nuit longue » appliqué est plus grand.

2.5. Eau

La disponibilité en eau est le facteur décisif pour le succès de la culture du mil (Bley, 1990). Plusieurs études ont montré qu'une insuffisance hydrique en fin de cycle peut réduire ou même annuler les effets positifs des techniques d'augmentation des rendements du mil telle que l'application des fertilisants azotés (Donald et Hamblin, 1976 ; Cissé, 1986), le travail du sol (Chopart et Koné, 1994), ou l'utilisation des variétés améliorées (Vaksmann *et al.*, 1996). Ceci, du fait de l'influence de ces techniques sur le développement et par conséquent les besoins en eau de la culture (Cissé 1986 ; Payne *et al.*, 1990 ; Vachaud et Klaij, 1992). En outre, Lawson et Sivakumar (1991) puis Dancette (1991) ont montré que les niveaux de consommation hydrique peuvent être beaucoup plus bas lorsque la fertilité est médiocre, même si l'eau n'est pas un facteur limitant. Des résultats similaires ont été également obtenus par Payne *et al.*, (1990) et Vachaud et Klaij, (1992) qui, suite aux travaux qu'ils ont mené au Niger, ont souligné qu'en conditions de faible fertilité, l'eau de pluie n'est pas utilisée de façon efficiente. Des résultats similaires ont été également trouvés sur le maïs par Green et Read, (1983).

Ces observations sous-tendent qu'en condition de basse fertilité, l'eau n'est pas le premier facteur limitant de la production du mil. Cissé (1986), cité par Amadou (1994), a montré que malgré des pluies très faibles (< 300 mm), l'apport de fumure organique sur un sol pauvre permet une augmentation de la biomasse aérienne consécutive à un accroissement de la consommation hydrique. L'effet de la fertilisation doit souvent une partie de son efficacité à un bon travail du sol, permettant une meilleure amélioration des caractéristiques physique et hydrique du profil cultural (Charreau et Nicou, 1971 cités par Pieri, 1986 et Traoré, 1988). Le développement végétatif abondant favorisé par la fertilisation azotée, constitue aussi une cause d'augmentation des besoins en eau de la culture. Cependant, les évaluations de ces besoins hydriques ne tiennent pas toujours compte des effets de la fertilité du sol et la densité de semis, qui sont des facteurs aussi importants que les comportements variétaux dans la variabilité de la biomasse aérienne (Sogodogo et Shetty, 1991). Des résultats obtenus par Anonyme (1993) et Laouan (1996), ont montré que le rendement en grain du mil n'est pas linéairement croissant avec la fertilité du sol, du fait qu'il est aussi lié à la disponibilité en eau et à la densité de semis, pour une même variété.

2.6. Impact du stress hydrique et mécanismes d'adaptation

Le mil est une plante dont les exigences en eau ne sont pas élevées. Son milieu de culture est caractérisé par une grande variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie. Le semis du mil se fait à sec ou généralement après une pluie d'au moins 10 mm, soit 15 cm de profondeur

d'humidité en sol sableux. Grâce à des caractéristiques propres à la plante (enracinement important, forte capacité de tallage, sensibilité à la longueur du jour, faible exigence photosynthétique) ou se rapportant à des techniques culturales (économie d'eau par culture extensive à faible densité de semis), le mil supporte mal les excès d'eau et a une grande tolérance à la sécheresse (Winkel et Do, 1992).

Néanmoins, l'instabilité des conditions climatiques sahéliennes l'expose souvent à des situations de stress hydrique, lorsque les pertes d'eau par transpiration deviennent plus élevées que son absorption par les racines. Si ces pertes continuent à s'intensifier sans être compensées par une alimentation en eau suffisante, la plante flétrit et son métabolisme général se ralentit. Lorsque le flétrissement est trop avancé, il devient généralement irréversible et la plante finit par mourir de manque d'eau (Paul, 1981).

Lorsque le déficit hydrique devient important, il influence tous les aspects de la croissance de la plante. Il entraîne la sénescence ou la fanaison, la perte des talles les plus jeunes, le ralentissement de la floraison, l'accroissement de l'allocation de la biomasse vers les épis en remplissage, le flétrissement et à plus long terme, la mort de la plante.

Les premiers effets se remarquent sur les feuilles dont l'initiation et l'expansion sont réduites et la sénescence accélérée (Maracchi *et al.*, 1992 ; Cantini, 1995) au moment où le taux d'apparition de nouvelles feuilles reste inchangé. Le déficit en eau modifie aussi la redistribution des assimilats entre les organes. La partie aérienne est ainsi plus sensible au stress que la biomasse racinaire ; ce qui entraîne une augmentation du rapport racines / partie aérienne. Une période de déficit hydrique pendant l'initiation de la floraison, provoque une accélération du développement de la plante tandis que, si elle intervient avant l'induction florale, elle entraîne un retard dans le développement ontogénique de la plante (Cantini, 1995). Dans les pays du Sahel, les stress hydriques surviennent surtout vers la fin du cycle, pendant la phase épiaison–floraison et entraînent des baisses considérables ou même anéantissent le rendement de la culture (Witt, 1981 ; Somé, 1990 ; Kaushik et Gautam, 1994).

Néanmoins, les plantes ont des mécanismes de contrôle des dépenses en eau qui leur permettent de s'adapter et de se reproduire sous les climats plus ou moins secs de la zone sahélienne cultivable (Jean-Louis, 1994). Ainsi, en cas d'un stress hydrique de fin de cycle, le mil arrête sa croissance et accélère la sénescence de ses feuilles en vue de ralentir les dépenses en eau et de maintenir sur les feuilles supérieures des tiges épiées un état hydrique favorable à l'assimilation carbonée et donc au remplissage des grains.

De façon générale, Ben Salam, (1988) puis Ben Salam et Vieira Da Silva, (1991), indiquent qu'en raison du caractère imprévisible de la contrainte hydrique, certaines variétés de céréales résistent au manque d'eau par des phénomènes physiologiques induits par des facteurs

climatiques (lumière, température, etc.). Elles adoptent ainsi des stratégies englobant un ou plusieurs mécanismes de tolérance et/ou d'évitement de la contrainte hydrique. Pour se développer et acquérir une aptitude à fleurir, certaines variétés exigent, outre la satisfaction des besoins hydriques et minéraux, la réalisation des conditions externes (d'ordre climatique) influençant les mécanismes hormonaux de leur développement. Il s'agit de la vernalisation (liée à un séjour de la plante sous des températures basses ou modérées) et surtout du photopériodisme (lié à la durée journalière de l'éclairement solaire).

Ainsi, le mil, plante plus rustique que les autres céréales (sorgho, maïs), s'adapte plus facilement aux variations des conditions pluviométriques, au détriment de son potentiel de rendement absolu (Somé, 1990). Ses besoins en eau varient en fonction de la variété dans son environnement agroclimatique et le minimum requis est de 300 mm pour le mil nain (Diop, 1999). Cette variabilité s'explique par la durée du cycle et des différentes phases phénologiques des différentes variétés. La phase de l'épiaison (où le manque d'eau entraîne l'avortement des panicules) est la plus sensible à un déficit hydrique (Hubert, 1970, cité par Diop, 1999).

Pour les variétés photosensibles, le raccourcissement de la durée du cycle avec le retard de semis, entraîne la réduction de la biomasse totale produite par la culture, notamment le nombre et la surface des feuilles (Craufurd et Bidinger, 1988 ; Sangaré, 1999) et le poids des pailles (Kassam et Andrews, 1975 ; Bacci *et al.*, 1998 ; Reddy et Visser, 1993). Cette réduction de biomasse provoque une réduction des besoins en eau par rapport à la même culture semée plus tôt. Ceci révèle un mécanisme d'économie d'eau comme les autres processus d'évitement ou aptitude de la plante à éviter le dessèchement (et non la sécheresse) en maintenant dans ses tissus une hydratation élevée par la réduction de ses pertes en eau, soit par résistance stomatique et cuticulaire, soit par un maintien de l'alimentation hydrique par un système racinaire plus adapté. Ainsi, les plantes photosensibles des zones semi-arides adaptent leur développement au photopériodisme qui caractérise le climat soudano-sahélien (Vaksmann *et al.*, 1996).

Chapitre 3 : Exigences agronomiques du mil

3.1. Fertilisation

Le mil répond bien à la fertilisation et est très sensible à l'application d'engrais et de fumier (Pandey *et al.*, 2001). Du fait de ses nombreux avantages, l'apport de fumure organique sous forme d'excréments d'animaux et de résidus végétaux était la pratique la plus courante en milieu paysan au Niger (De Rouw, 1994). En effet, la fumure organique a une minéralisation

étalée dans le temps (notamment l'ammonification qui précède la nitrification) et permet un renouvellement continu de l'humus et une bonne amélioration de la structure du sol. Elle tend cependant à être remplacée par les engrais chimiques, du fait que le cheptel et les végétaux producteurs de la matière organique se raréfient sans cesse sous l'impact de la désertification et des sécheresses répétitives qui sévissent au Sahel. C'est ainsi que l'amélioration des rendements du mil sur les sols dégradés du Sahel, se fait par l'apport de plus en plus important d'engrais chimiques dont les doses optimales recommandées par la recherche sont les suivantes :

- engrais azoté 50 kg ha⁻¹ d'urée au semis et 50 kg ha⁻¹ à la montaison,
- ou 100 kg ha⁻¹ de phosphate d'ammoniac au semis plus 50 kg ha⁻¹ d'urée à la montaison,
- ou 100 kg ha⁻¹ de NKP (15-15-15) au semis et 50 kg ha⁻¹ d'urée à la montaison.

Cependant, l'utilisation des fertilisants chimiques (les nitrates notamment) posent des problèmes liés à leur volatilité, leur grande solubilité, et leur non rétention par le complexe argilo humique du sol. Ils migrent avec les eaux de ruissellement ou d'infiltration dans le sol. La possibilité de leur conservation dans le sol est faible, d'où la nécessité de les répandre juste au moment où la plante en a besoin (période de tallage, de croissance ou de début de chlorose des feuilles).

En effet, la productivité du mil est essentiellement liée à une alimentation en phosphore et en azote, éléments pour lesquels il présente une grande capacité d'absorption racinaire et un fort taux d'assimilation nette. Selon Hafner (1992) et Rebaïka (1993), pour des productions en grains au-delà de la moyenne (~400 kg ha⁻¹), le phosphore constitue la contrainte principale au Niger, de même qu'au Mali où, d'après Traoré (1988), il constitue le pivot de la fumure annuelle des céréales devant l'azote et les autres éléments essentiels. Cependant, il a été prouvé que l'application d'azote affecte toujours positivement les rendements du mil même à un niveau bas, lorsqu'il n'y a pas de déficit hydrique pendant la croissance (Bacci *et al* 1998). Le rendement du mil est étroitement lié à l'interaction entre le facteur hydrique et les éléments nutritifs (Sogodogo et Shetty, 1991 ; Herrmann *et al.*, 1994). L'aspect positif de la fertilisation impliquera à son tour une augmentation des besoins en eau de la plante qui deviendrait plus sensible à la sécheresse. Ceci amène les traitements fertilisants à n'être bons pour augmenter le rendement en paille et grains du mil, qu'avec un potentiel de dépense hydrique aussi élevé (Mason, 2001). Dans des conditions hydriques limitantes, la production du mil diminue avec l'apport d'azote à forte dose. En effet, en situation de déficit hydrique, l'azote apporté à fortes doses inhibe l'enzyme clé (la nitrate réductase) de sa propre assimilation ; ce qui se traduit par une importante baisse de la production (Anonyme, 1998).

3.2. Densité de semis

La densité de semis fait partie des paramètres les plus importants pour la réussite de la culture du mil au Sahel. Elle présente un effet positif sur l'augmentation du nombre d'épis récoltables et se définit en fonction de l'aridité, de la fertilité du sol et de la date de semis (Anonyme, 1993 ; Pale, 2001). Ainsi, les densités de semis prévues pour des sols fertiles doivent être diminuées de 50 % sur des sols pauvres, du fait de l'interaction entre le nombre de plants et le niveau de fertilité de la parcelle (Anonyme, 1993). En effet, une densité faible associée à l'apport d'une forte dose d'azote est favorable à l'accroissement du nombre d'épis productifs. Le nombre de talles utiles est ainsi inversement proportionnel à l'augmentation de la densité du semis. Selon Azam-Ali *et al.*, (1984), la variété BK-560 du mil donne presque trois fois plus de talles lorsqu'elle est cultivée à 2,9 plants m² qu'à 11,5 plants m². Les densités très fortes provoquent un mauvais remplissage des grains par rapport aux plus faibles qui au contraire, sont plus favorables à une bonne production grainière (Coulibaly *et al.*, 1988). L'efficacité de la densité de semis dépend également de la disponibilité en eau, quoique cet aspect n'ait pas encore été suffisamment abordé par la recherche. Toutefois, cela a été évoqué (Anonyme, 1993) par la recommandation de divers écartements entre les poquets de mil, pour différentes situations culturales, en fonction de la durée de la saison des pluies (tableau III).

L'application optimale de la densité de semis se fait généralement après le semis en effectuant le démariage. Le démariage doit être fait trois semaines après le semis, dans des conditions normales de la croissance du mil. Lorsque les conditions sont difficiles, il doit être fait pendant le tallage ou quand les plants ont une hauteur d'environ 20 cm (Anonyme, 1993). Il permet d'éviter l'encombrement des plants en réduisant leur nombre à 2, 3 ou 4 à l'intérieur d'un même poquet. Ceci augmente la disponibilité en eau et en nutriments minéraux pour les plants qui pourront ainsi mieux croître et développer assez de talles. Il joue ainsi un grand rôle dans l'augmentation de la biomasse foliaire lorsque les conditions sont favorables. Ce qui fait du démariage, une pratique culturale stratégique dont dépend la réussite de la culture du mil.

3.3. Labour et sarclages

Le labour avant semis est facultatif mais tout de même important, pour décompacter le sol et augmenter sa perméabilité, son aération et aussi sa fertilité en enfouissant la matière organique de surface. Le sarclage est utile pour éliminer les mauvaises herbes, augmenter la rugosité de la surface du sol et favoriser l'infiltration de l'eau. Au moins deux sarclages manuels (à l'hilaire ou à la daba) ou attelés (à la charrue), dont l'un juste après la levée et l'autre pendant la montaison, sont souhaités pour une bonne croissance du mil. Cependant, l'efficacité de ces techniques dépend des conditions climatiques.

Tableau III : Densité de semis en fonction de la pluviosité, du cycle variétal et de la fertilité du sol (Anonyme, 1993)

Durée de saison des pluies	Durée du cycle variétal	Apport d'engrais	Ecartement (m)
Courte : 70 à 85 jours	75 jours	Oui	1,5 x 1,5
		Non	2,0 x 1,0
Normale : 85 à 100 jours	90 jours	Oui	1,0 x 1,0
		Non	2,0 x 1,0
Normale : 110 à 115 jours	Locale	Oui	1,0 x 1,0
		Non	1,5 x 1,5
Longue : > à 115 jours	Locale	Oui	1,0 x 1,0
		Non	2,0 x 1,0

Chapitre 4 : Eléments du bilan hydrique et leur variabilité

4.1. Bilan hydrique

Le bilan hydrique traduit généralement la loi de la conservation de la masse d'eau liquide dans un système. Il représente la variation du stock hydrique qui se détermine par la différence entre la quantité d'eau entrante et celle sortante dans un système donné (Vachaud et Klaij, 1992). Lorsqu'il s'agit d'une surface cultivée, le bilan hydrique se limite à la zone de prospection racinaire du sol et se détermine par la relation suivante (Eagleman, 1971) :

$$\Delta S = P + I - ETR - D + RC + (\text{ou } -) R$$

Avec : ΔS = variation du stock d'eau dans la zone prospectée par les racines ; P = apports d'eau dus aux précipitations ; I = apport d'eau par irrigation ; ETR = perte d'eau par évapotranspiration (évapotranspiration réelle) D = pertes d'eau par drainage hors de la zone racinaire ; RC = eau de la remontée capillaire dans la zone de prospection racinaire ; R = échanges latéraux d'eau.

La remontée capillaire et le drainage sont deux mouvements hydriques, de sens inverses par rapport à la zone de prospection racinaire, qui se déterminent par la mesure des gradients de potentiel hydrique à l'aide de tensiomètres. La variation du stock d'eau dans la zone de prospection racinaire se détermine, quant à elle, par humidimètre neutronique ou par la méthode gravimétrique (Amadou, 1994). Très souvent, sur les terrains sableux et non pentus où les taux d'infiltration sont élevés, le ruissellement est considéré négligeable devant l'ETR qui représente ainsi la principale perte en eau du bilan.

4.2. Variabilité de l'ETR

L'évapotranspiration réelle (ETR) se calcule à partir de l'équation simple du bilan hydrique :

$$ETR = P \pm R - D + RC - \Delta S$$

Avec : P = apports en eau par les pluies, R = ruissellement, D = drainage profond, RC = remontée capillaire et ΔS = variations du stock d'eau entre deux dates d'observations.

Selon Dancette (1976), l'ETR équivaut aux pertes réelles d'eau d'un couvert végétal soumis aux aléas pluviométriques, en particulier à des périodes d'alimentation hydrique déficitaire. Les plantes perdent de l'eau par transpiration foliaire qui s'accroît sous les effets des facteurs d'aridité, entraînant le dessèchement du sol et limitant l'absorption racinaire. Ce qui conduit à un déficit hydrique dû à l'effet combiné de la demande énergétique du climat, de l'eau disponible dans le sol et de la faculté d'absorption du système racinaire par rapport aux taux de transpiration (Charoy *et al.*, 1983). L'ETR est ainsi en liaison directe avec la pluviométrie,

le rayonnement solaire, la capacité de stockage d'eau par le sol et le développement foliaire de la plante (Soegaard et Boegh, 1993). Elle peut être égale, inférieure ou supérieure à la quantité d'eau absorbée par les racines, selon la réserve hydrique du sol, la demande évaporative et l'abondance du couvert végétatif de la culture. Selon Dancette (1976), plus la pluviométrie est forte, plus l'ETR devient élevée et tend à atteindre l'ET_o qui, au contraire, chute à son niveau le plus bas. La détermination de l'ETR nécessite donc une bonne fixation de la réserve en eau utile du sol où la culture est pratiquée.

Dancette (1971) a mesuré au Sénégal, sur un sol sablonneux et fertilisé, le bilan hydrique de la variété *Souna* de mil, dans deux conditions pluviométriques différentes : une année peu pluvieuse (P = 360 mm) où il a calculé une ETR de 302 mm et une année très pluvieuse (P = 642 mm) avec une ETR égale à 321 mm, pour une durée de cycle végétatif de 100 jours dans les deux cas. Des résultats similaires ont été obtenus au Niger par Nouri *et al.*, (1989) qui ont mesuré une ETR de 227 mm à Tarna et de 330 mm à Kollo, pour des cumuls de pluies de 237 mm et de 482 mm, respectivement. Ces auteurs ont mis la variation du bilan hydrique en liaison avec la disponibilité en eau pour la culture. Cependant, Kassam et Kowal (1975) ont montré au Nigeria, que le bilan hydrique dépend aussi du développement de la biomasse aérienne de la plante et que les périodes de forte consommation en eau correspondent à la phase du LAI élevé, qui coïncide avec le moment le plus humide du cycle végétatif. Ces propos ont été soutenus par Amadou (1994) qui, en condition de disponibilité en eau, a expliqué l'élévation de l'ETR pendant la période d'abondance du LAI par la plus grande captation de l'énergie solaire que permet le feuillage du mil à ce stade. Par ailleurs, Cantini *et al.*, (1998) ont établi une relation linéaire entre le LAI et la transpiration. Selon Anonyme (1993), la surface foliaire totale du mil résulte du nombre des talles et détermine la consommation de l'eau par la plante. Pour ces auteurs, la plante ajuste son LAI à la disponibilité en eau et en lumière. C'est ainsi qu'il a été montré par Laouan (1996) que l'ETR augmente en fonction du degré d'enracinement, de l'indice foliaire et de la longueur du cycle. Par contre, elle diminue avec le vieillissement et la sénescence de la plante et aussi lorsque l'eau du sol devient difficile à extraire par les racines (Dancette, 1991). Ceci mettrait le bilan hydrique sous l'influence des pratiques culturales (date de semis, apport de fertilisants et densité de semis) susceptibles de faire varier le développement foliaire de la culture. Dans des situations hydriques optimales et des techniques culturales favorables, l'ETR devient très élevée et tend à atteindre l'évapotranspiration maximale (ETM) de la même culture.

4.3. Variabilité de l'ETM

D'après Dancette (1976), l'ETM représente les pertes maximales d'eau d'une culture (considérée dans sa dualité sol- végétal) largement alimentée en eau et passant par tous les

stades de croissance de développement et donc de couverture plus ou moins parfaite du sol. On ne pourrait donc parler d'ETM que si l'eau n'est pas un facteur limitant (Dancette, 1991). Sous un climat donné, elle dépend de la variété cultivée et varie selon les stades de croissance et de développement de la culture. Elle traduit ainsi les besoins en eau de la culture en fonction des conditions du milieu. Dancette (1978) a estimé, en deux années consécutives, des valeurs d'ETM égales à 562 mm en 1976 et 628 mm en 1977 pour la même variété *sanio* du mil, au Sénégal. D'autres études réalisées en 1983 par le même auteur et par Anonyme (1993) ont montré que les valeurs d'ETM sont relativement croissantes avec la demande évaporative et la durée du cycle de la culture. Ces auteurs ont trouvé des valeurs d'ETM de 320 et 345 mm pour le mil *nain* de 75 jours, 416 et 418 mm pour le mil *souna* de 90 jours, 628 et 598 mm pour le mil *sanio* de 120 jours. D'autres investigations, faites dans la région de Tillabery (Niger) par Kalms et Valet (1975) puis par Valet et Albert (1976) sur les variétés *P3Kolo*, *1/2souna* et la variété locale, ont donné des valeurs d'ETM réparties au cours du cycle comme indiqué dans le Tableau IV. Cependant, Gandah (1991) a obtenu dans la même localité de Tillabery et pour la même variété *P3Kolo*, une ETM de 630 mm, soit une valeur double de celle obtenue par Valet et Albert (1976). Cet écart pourrait être attribué à une différence de dates de semis de la variété, si celle-ci est bien photosensible.

Si c'est le cas, cela montre la nécessité de prendre en compte l'effet du photopériodisme dans la détermination des besoins en eau des variétés cultivées du mil. En plus, les besoins en eau du mil doivent être actualisés, pour qu'ils intègrent aussi bien l'impact du climat que celui des techniques culturales. Les résultats obtenus par le passé, ne remplissant pas cette condition mais qui continuent d'être considérés comme référence, doivent ainsi être repris. Lorsque l'eau et la fertilité du sol sont suffisantes pour permettre un bon développement de la culture, les dépenses hydriques deviennent systématiquement élevées avec l'augmentation de la température et du rayonnement solaire et tendent à avoisiner l'évapotranspiration potentielle (ET_o).

Tableau IV : Besoins en eau de 3 variétés de mil mesurés par Valet et Albert (1976) à Tillabery au Niger (*Amadou; 1994*).

	Variété locale		P3 Kolo		½ Souna	
	(mm)	(mm /j)	(mm)	(mm / j)	(mm)	(mm / j)
Du semis au 37^e JAS	103	2,8	111	3,0	115	3,1
Du 38^e au 64^e JAS	122	4,5	135	5,0	95	3,5
Du 65^e au 77^e JAS	45	3,5	36	2,8	29	2,3
Du 78^e au 106^e JAS	73	2,5	96	3,3	75	2,6
TOTAL CYCLE	343		378		315	

4.4. Variabilité de l'ET₀

L'évapotranspiration potentielle ou de référence (ET₀) journalière se calcule par la formule suivante (Allen *et al.*, 1998) :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Avec : ET₀ = évapotranspiration de référence [mm jour⁻¹], R_n = radiation nette interceptée par la surface foliaire [MJ m⁻² jour⁻¹], G = densité de flux de chaleur [MJ m⁻² jour⁻¹], T = température de l'air à 2 m [°C], U₂ = vitesse du vent à 2 m [m s⁻¹], e_s = tension de vapeur à la saturation [kPa], e_a = tension réelle de vapeur [kPa], e_s - e_a = déficit de saturation [kPa], Δ = pente de la courbe de tension de vapeur [kPa °C⁻¹], γ = constante psychrométrique [kPa °C⁻¹].

L'ET₀ équivaut aux dépenses hydriques recouvrant l'évaporation du sol et la transpiration de la plante. Elle représente, pour une durée donnée, la perte maximale d'eau d'un couvert végétal abondant et uniforme, de faible hauteur (un gazon tondu par exemple), en pleine croissance, largement alimenté en eau, sans qu'il ait intervention de la régulation stomatique (Charoy *et al.*, 1983 ; Diop, 1999). Cette définition a été retenue par la plupart des bioclimatologistes, quoique son application comme référence de mesure pour la recherche ne reflète pas toujours les réalités des pays sahéliens.

En effet, les valeurs d'ET₀ obtenues dans une région donnée peuvent changer dans une autre région ; du fait que les paramètres qui interviennent le plus dans leur variation diffèrent d'une zone climatique à une autre. Dans les régions tropicales humides et soudaniennes, l'ET₀ dépendrait plus du rayonnement solaire et de la température (Lawson et Sivakumar, 1991). Par contre, dans la zone sahélienne, c'est plutôt l'eau qui constitue le facteur limitant. La stabilité de l'ET₀ dans une zone climatique donnée serait ainsi liée à celle des conditions climatiques qui y prévalent. Selon Frère et Popov (1979), les valeurs d'ET₀ calculées pour une station pourraient être utilisées dans des stations voisines, si toutefois celles-ci présentent des conditions similaires d'altitude, de température, d'humidité, d'insolation et de vent. Cependant, cela est difficilement applicable dans les zones soudano-sahéliennes où, du fait de la variabilité importante des facteurs pédoclimatiques, il est rare d'avoir des cultures en conditions agronomiques adéquates pour une meilleure évaluation de l'ET₀.

Les diverses formules empiriques existantes pour la détermination de l'ET₀ et des besoins en eau des plantes ne sont pas valablement applicables dans des conditions agroclimatiques défavorables (Dancette, 1976). Selon cet auteur, l'ET₀ dépend également de la culture elle-même et de tous les paramètres intervenant dans sa croissance, comme le type de sol, l'humidité relative, la vitesse du vent, la pluie, l'ensoleillement, etc. Il est donc vain de vouloir faire de la mesure de l'ET₀ à partir d'un gazon, une mesure de référence satisfaisante

et qui ne dépend que du facteur climatique (Bernard, 1956). Ceci, du fait que tous les phénomènes physiques qui interviennent dans les processus végétaux et leur interférence ne sont pas bien connus, en climat soudano-sahélien.

L'ETo se calcule à partir des éléments essentiels suivants :

- la disponibilité de l'eau dans la rhizosphère de la plante et les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques du sol ;
- le rapport entre la capacité d'absorption du système racinaire et le taux de transpiration de la plante. Ce rapport dépend du sol et de la physiologie de la plante ;
- l'énergie disponible au niveau des surfaces évaporantes. Elle correspond à la demande d'évaporation de l'atmosphère imposée par le climat (Brutsaert, 1982 ; Wallace *et al.*, 1993).

L'ETo peut être mesurée directement grâce à un bac normalisé de classe A, à un lysimètre (Dancette, 1978 ; Anonyme, 1991) ou se calculer à partir des méthodes (Penman, rapport de Bowen, Rayonnement, Blaney-Cridde, etc.) qui font appel à une différenciation entre les composantes physiques et celles de la culture. Cependant, ces méthodes sont souvent appliquées dans des conditions agroclimatiques qui diffèrent beaucoup de celles pour lesquelles elles ont été initialement mises au point. En effet, la demande hydrique imposée par le climat varie d'une période de l'année à l'autre, d'une année à l'autre au niveau d'un même site et aussi, d'un lieu à un autre (gradient de latitude, continentalité) au cours d'une même année. Elle augmente avec l'aridité du climat, et est plus élevée dans les zones soudano-sahéliennes (Dancette, 1976). Il est alors nécessaire de connaître les quantités d'eau maximales qui peuvent transiter par le couvert de la culture du mil, sous l'effet des principaux facteurs climatiques et pédologiques propres à un pays ou une zone donnée.

4.5. Evaluation des coefficients cultureux (K_c) du mil

Le plus souvent, la détermination des besoins en eau des cultures se fait avec des casiers lysimétriques où l'on mesure l'évapotranspiration maximale (ETM) en conditions hydriques non limitantes. On en déduit les coefficients cultureux (K_c), qui représentent le rapport entre les besoins en eau de la culture (ETM) à un stade phénologique donné et la demande évaporative de l'atmosphère (ETo) (Freteaud *et al.*, 1984). Or, l'utilisation des lysimètres n'est pas toujours commode pour certains auteurs, aussi bien en termes de coûts que de temps ; même si par ailleurs ils demeurent l'outil privilégié de détermination des besoins en eau des cultures pour les chercheurs qui les considèrent comme référence et s'en servent généralement pour évaluer d'autres méthodes (Hangmann, 1994 ; Kashyap et Panda, 2001). Certains chercheurs ont proposé d'utiliser des relations établies entre les K_c et le LAI, variable plus facilement mesurable et assez représentative des conditions environnementales de croissance de la plante

(Brun *et al.*, 1972 ; Kanemasu *et al.*, 1976 ; Tanner et Jury, 1976 ; Rosenthal *et al.*, 1977 ; Abdulmumin et Misari, 1989 ; Al-Kaisi *et al.*, 1989 ; Brisson *et al.*, 1992 ; Affholder, 1997).

Ainsi, la relation, $Kc = 0,16 * LAI + 0,73$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,76$, établie par Affholder (1991) entre le LAI et les Kc du mil au Sénégal devrait permettre de tenir compte de l'effet, non seulement du photopériodisme, mais aussi de la fertilisation, de la densité de semis ou des stress hydriques influençant la production de la biomasse.

En effet, les Kc traduisent, de la même manière que l'ETM, les besoins en eau d'une culture donnée, suivant les différents stades de son développement phénologique, à une latitude donnée (Forest, 1990). Ils dépendent des conditions météorologiques lors des mesures (Frère et Popov, 1979) et de façon plus étroite, aux phases de découpage du cycle végétatif de la culture. Selon Annandale et Stockle (1994), ils varient avec le rayonnement solaire, la température de l'air, la tension de vapeur et la vitesse du vent. Ils dépendent aussi de la variété. Dancette (1978), a mis en évidence, au Sénégal, les différences entre les Kc de trois sortes de mil. Il obtient des valeurs de Kc égales à 1,20 pour le mil *sanio* (120 jours), 1,10 pour le mil *souna* (90 jours) et 0,97 pour le mil *GAM* (75 jours). Frère et Popov, (1987) ont donné, dans le tableau V, des séries détaillées de coefficients culturaux décennaux en fonction de la durée du cycle végétatif du mil.

Cependant, d'après Forest (1990), les Kc obtenus en station par la recherche ne sont pas toujours représentatifs d'un régime pluviométrique annuel. Ils varient avec le rapport Pluies / ETo. Ils diminuent, dans des conditions d'aridité et surtout sur un sol pauvre en fumure, lorsque le peuplement de la culture est moins dense, cela à cause du développement du tallage et de la surface foliaire qui, par conséquent, deviennent minimales (Forest, 1990).

En reliant les valeurs d'ETM à la demande évaporative (ETo) par le Kc, Dancette (1983), avait émis la possibilité d'extrapoler les résultats obtenus dans une zone à d'autres zones de climats semblables. Cet auteur tend ainsi à négliger les effets du sol et des pratiques culturales devant le seul impact climatique. Or, les besoins en eau d'une culture en bonnes conditions agroclimatiques ne sont pas les mêmes que ceux mesurés dans un milieu confronté à toutes les limitations physico-chimiques. En effet, dans son milieu, la plante est soumise à divers niveaux d'énergie et à divers gradients de température, de lumière, de gaz carbonique, d'oxygène, de pression atmosphérique et de la qualité du sol qui l'amène à réagir par des mécanismes de contrôle et d'adaptation, afin de maintenir continuellement un équilibre dynamique favorable à sa croissance et indispensable à sa survie. Face à « une demande » climatique, la plante répond par « une offre de croissance ». Cette offre dépend à la fois des disponibilités hydriques du sol et des propriétés physiques et biologiques de l'ensemble du système sol – plante- atmosphère.

Tableau V : Coefficients cultureux par décade après semis, en fonction du cycle de développement de différentes variétés de mil (*Frère et Popov, 1987*).

Décade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kc : cycle de 80 jours	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8	0,5				
Kc : cycle de 100 jours	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8	0,6	0,5		
Kc : cycle de 120 jours	0,3	0,4	0,5	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5

Chapitre 5 : Simulation des rendements du mil

5.1. Historique et limites du modèle utilisé par l'Agrhymet

Pour effectuer le suivi opérationnel des campagnes agricoles dans les pays du Sahel, le Centre Régional Agrhymet utilise, depuis 1988, le logiciel du Diagnostic Hydrique des Cultures (DHC). Ce modèle est dérivé du logiciel BIP, un instrument développé à l'IRAT/CIRAD en France, pour permettre le suivi d'hivernage sur la base du bilan hydrique (Forest, 1984 ; Ganzin, 1989).

En effet, le modèle BIP permet d'évaluer, aux pas de temps décadaire ou pentadaire, les éléments du bilan hydrique à partir de l'offre en eau (pluie + stock d'eau dans le sol) et de la dépense en eau (ETR, drainage) à un instant donné. Il permet l'estimation de l'ETR de la culture selon l'équation d'Eagleman (Forest, 1984). Pendant qu'il était largement utilisé au CIRAD et dans certains pays de l'Afrique de l'Ouest comme le Sénégal, le Mali, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire et le Togo, le BIP a subi plusieurs améliorations qui ont donné sa dernière version (BIP4).

Cependant, jusqu'à sa version 4, le modèle BIP ne pouvait traiter que les données d'une seule station à la fois. Afin de l'adapter aux besoins spécifiques du CRA et de ses composantes nationales (essentiellement les services météo), une nouvelle version a été développée. Cette version, dénommée DHC ou Diagnostic Hydrique de Culture, intègre dans ses algorithmes, une formule de calcul des rendements simulés sur la base du bilan hydrique et permet, non seulement de traiter les données de plusieurs stations à la fois, mais aussi d'écrire des fichiers batch pour le lancement automatique de plusieurs simulations (Girard, 1995). A partir des données de la pluviométrie et de l'ETo, le DHC permettait le calcul du bilan hydrique aux pas de temps pentadaire et le traçage d'un graphique de variation du pourcentage de satisfaction des besoins en eau de la culture (défini par le rapport ETR/ETM) en fonction du temps. Ayant également subi plusieurs modifications le DHC permettait sous sa version 3 de :

- modéliser la descente du front racinaire en fonction de la descente du front d'humectation et de la vitesse d'enracinement ;
- calculer l'évaporation sol nu (15 cm de sol) en début de cycle (20 premiers jours) ;
- calculer les coefficients culturaux régionalisés en fonction de la latitude.

Outre les sorties que permettaient les versions antérieures, le DHC 3 a connu l'introduction de la variable IRESP ou Indice de Rendement ESPéré qui se calcule selon la formule :

$$\text{IRESP} = \text{ETR/ETM}_{(\text{cycle})} \times \text{ETR/ETM}_{(\text{floraison})}$$

La version 4 du DHC a été développée en 1992, pour permettre l'utilisation directe des données issues des bases de données existantes au CRA, notamment CLIMBASE pour les données historiques et SUIVI pour les données de l'année en cours.

Selon Girard (1995), c'est sous cette dernière version que les performances de calcul des algorithmes du modèle DHC ont été augmentées pour permettre non seulement la simulation sur un nombre illimité de stations pour plusieurs années à la fois, mais aussi l'adaptation des résultats et des méthodes de simulation aux traitements cartographiques ou statistiques. En effet, le DHC4 utilise l'algorithme suivant du calcul d'ETR développé par Eagleman (1971) :

$$\text{ETR} = 0,732 - 0,05 \times \text{ETM} + (4,97 \times \text{ETM} - 0,661 \times \text{ETM}^2) \times \text{HR} - (8,57 \times \text{ETM} - 1,56 \times \text{ETM}^2) \times \text{HR}^2 + (4,35 \times \text{ETM} - 0,88 \times \text{ETM}^2) \times \text{HR}^3$$

(cf. Girard et al., 1994)

Avec : **HR** = Taux d'humidité de la tranche de sol considérée ; **ETM** = Evapotranspiration maximale de la culture = $Kc \times E_{Top}$ où Kc = coefficient cultural et E_{Top} = évapotranspiration Penman calculée à partir de l' E_{To} décadaire de l'ATLAS [E_{To} Morel (moyenne 1951 – 1980)].

Cet algorithme permet d'estimer les termes du bilan hydrique de la culture à partir des paramètres d'entrée suivants :

- les données journalières de pluies du milieu de culture, saisies sur le logiciel "SUIVI" pour l'année en cours et sur "CLIMBASE" pour les données historiques des 30 dernières années ;
- la demande évaporative (E_{To}) ;
- la durée du cycle végétatif : celle-ci est choisie dans les mesures de l'éventail disponible des durées de cycles des variétés (90 à 120 jours pour le mil), de façon qu'elle soit calée sur la durée de la saison des pluies ;
- la date de semis : elle est fonction de la date de réception des premières pluies. Elle est souvent soumise au risque d'installation, immédiatement après le semis, d'un épisode sec entraînant la mort des jeunes pousses et obligeant parfois les paysans à ressemer ;
- la réserve utile racinaire (RUR) : elle est définie comme étant le volume du réservoir d'eau exploitable par les racines de la culture. Cette notion intègre la réserve utile (RU) du sol, qui est fonction de la structure, la texture, la profondeur, la capacité de rétention, la teneur en matière organique et d'autres propriétés d'enracinement (profondeur et densité) de la culture (Bousnina et Mihri, 1997). Selon Baron et al. (1999) et Sultan (2002), le modèle DHC utilise deux réservoirs, dont l'un à la surface (20 cm) et l'autre sur une épaisseur de sol variable en fonction du front racinaire dont la descente est pilotée par le stade de développement de la culture et limitée par la progression du front d'humectation (figure 2) ;

- les coefficients culturaux (K_c) qui varient selon les phases phénologiques de la culture.

La simulation du bilan hydrique du modèle DHC est une approche dynamique de restitution des processus de transfert de flux entre le sol, la plante et l'atmosphère (Reyniers, 1994). Cependant, le DHC considère les K_c comme des variables qui n'évoluent que dans le temps par rapport au développement de la culture, selon les phases essentielles suivantes : IDV, FL1, FL2 et MAT. Selon Traoré (2001) ces phases peuvent être découpées dans les zones soudano-sahéliennes des pays du CILSS comme suit :

- la IDV ou phase de la levée (avec K_c début ou minimal), varie selon la date de semis mais avec une durée minimum de 20 jours représentant la précocité intrinsèque de la variété ;
- la FL1 débute à l'initiation paniculaire et dure 20 jours avant la date de l'épiaison ;
- la FL2 dure 20 jours après l'épiaison ;
- la MAT correspond au K_c fin et dure 15 jours pour les mils et 20 jours pour les sorghos.

La FL1 et FL2 correspondent au K_c maximum, donc à la période de besoins en eau les plus élevés. La durée de chaque phase est fonction de la longueur du cycle de la culture. La durée de IDV ou phase d'installation est d'autant plus longue que le cycle de la culture est long (Somé, 1990). C'est ainsi qu'elle constitue la majeure cause des variations dans les cycles du développement du mil, particulièrement pour les variétés photosensibles. Elle a un effet déterminant sur le nombre de talles productives par plant et sur leur rendement en grain (Craufurd et Bidinger, 1988). La durée de la phase IDV peut être déterminée à l'aide du découpage adopté par Traoré (2001) et qui consiste à soustraire 55 ou 60 jours de la durée du cycle potentielle estimée à partir de la date du démarrage de la saison en cours et la date moyenne de fin des pluies.

A partir des données d'entrées, le DHC4 permet de sortir en temps réel :

- l'indice de satisfaction des besoins en eau pentadaire ou décadaire et l'indice de satisfaction cumulé depuis le début du cycle. Cet indice est exprimé par le rapport ETR/ETM qui, plus il est faible, plus la culture subit un stress hydrique important ;
- l'indice de rendements espérés (IRESP) et les rendements simulés. Cet indice est déterminé par le modèle sur la base de la satisfaction des besoins en eau de la culture. Il prend en compte les conditions moyennes ayant prévalu durant le cycle de croissance de la culture, y compris celles relatives aux phases les plus sensibles (Sultan, 2002) ;
- la prévision des besoins en eau pour la décade prochaine.

En définitive, le DHC4 a été conçu au départ pour les pays du CILSS au niveau desquels il permettait de connaître la date de démarrage de la campagne dans les différentes zones pour faciliter l'appréciation des retards ou des avances par rapport à des années de référence et

l'estimation précoce des rendements du mil. Baron et Dingkuhn (2003) ont établi une relation linéaire entre les rendements simulés par DHC et ceux observés sur le terrain (figure 3).

$$(R) \rightarrow Rdt = a + b \text{ IRESP (Baron et Dingkuhn, 2003)}$$

Le DHC4 permet également la réalisation de trois sortes de bilans :

- le bilan annuel qui permet de suivre l'état hydrique des cultures en cours de campagne ;
- le bilan prévisionnel qui permet de calculer le rendement espéré du mil deux mois avant la fin de la campagne (Samba *et al.*, 2001). Ce bilan utilise les données pluviométriques de l'année en cours complétées par les données historiques des 30 dernières années ;
- le bilan historique qui est basé sur les données pluviométriques de plusieurs années pour sortir les mêmes variables que le bilan prévisionnel.

C'est ainsi que le logiciel DHC a pu rendre de grands services dans le suivi des campagnes agricoles du mil dans les pays du CILSS (Samba, 1998). Cependant, jusqu'à sa dernière version (DHC4) le modèle présente encore des insuffisances notoires. En effet, il ne prend pas en compte les effets d'excès temporaires d'eau des sols, la fertilité des sols ou l'emploi éventuel d'engrais, la densité de semis et le ruissellement des eaux de surface (considéré comme nul dans la zone sahélienne). En outre, malgré les différentes mises à jour et adaptations aux besoins des utilisateurs, cette dernière version du DHC ne permet de prévoir que les rendements du mil (*Pennisetum glaucum* [L.] R.Br.), dans la bande sahélienne. Dans ces prévisions, les caractéristiques de la culture comme la durée des phases phénologiques et les besoins en eau correspondants (Kc) sont supposés invariables pour une variété donnée. Alors qu'il existe, à travers la complexité, l'instabilité et l'hétérogénéité des conditions de culture, des facteurs aussi bien physiques, chimiques que biologiques susceptibles d'entraîner des variations dans ces caractéristiques.

Ceci a suscité la poursuite des investigations par l'unité de recherche "Ecotrop" du CIRAD qui a développé le modèle SARRA-H qui intègre désormais un bilan carboné de la plante et sa phénologie dans une approche simple et permettant la robustesse du modèle (Sultan, 2002 ; Dingkuhn *et al.*, 2003). Ainsi, le modèle SARRA-H permet de simuler les biomasses et les rendements potentiels sous la seule contrainte climatique. Il décrit la dynamique de la biomasse sur la base des phases de subdivisions du cycle de la plante suivantes :

- levée ;
- levée-initiation paniculaire (BVP) ;
- phase sensible à la photopériode (PSP) ;
- initiation paniculaire -floraison (RPR) ;
- floraison -maturité cireuse (Matu1) ;
- maturité cireuse -maturité totale (Matu2).

La durée des différentes phases est simulée dans le modèle à partir des données de température. La durée de ces phases est définie, selon la variété, par des constantes photothermiques calculées par le modèle à partir d'un seuil de températures journalières cumulées.

Chaque phase, à l'exception de la phase photosensible, est ainsi caractérisée par un certain temps thermique constant exprimé en degrés jours. Selon Baron et Dingkuhn (2003), le photopériodisme peut aussi être simulé selon trois dynamiques : linéaire, parabole, exponentielle basées sur la longueur du jour en fonction de la latitude. C'est dans cette dynamique que le modèle SARRA-H simule la réponse de la culture au stress hydrique à partir d'un bilan carboné établi en fonction de la fraction de lumière interceptée et de l'augmentation de la biomasse, donc du LAI (Dingkuhn *et al.*, 1999). Le passage de SARRA (équivalent au DHC4) à SARRA-H s'est opéré selon le schéma présenté dans la figure 2, et qui se résume par l'intégration des variables suivantes (Baron et Dingkuhn, 2003) :

- prise en compte de la phénologie et du photopériodisme ;
- intégration du processus d'élaboration et de répartition de la biomasse ;
- définition des Kc en fonction du LAI (biomasse) ;
- établissement du bilan hydrique à partir des réservoirs (sol-atmosphère), la transpiration de la plante et l'évaporation sol ;
- élaboration du rendement.

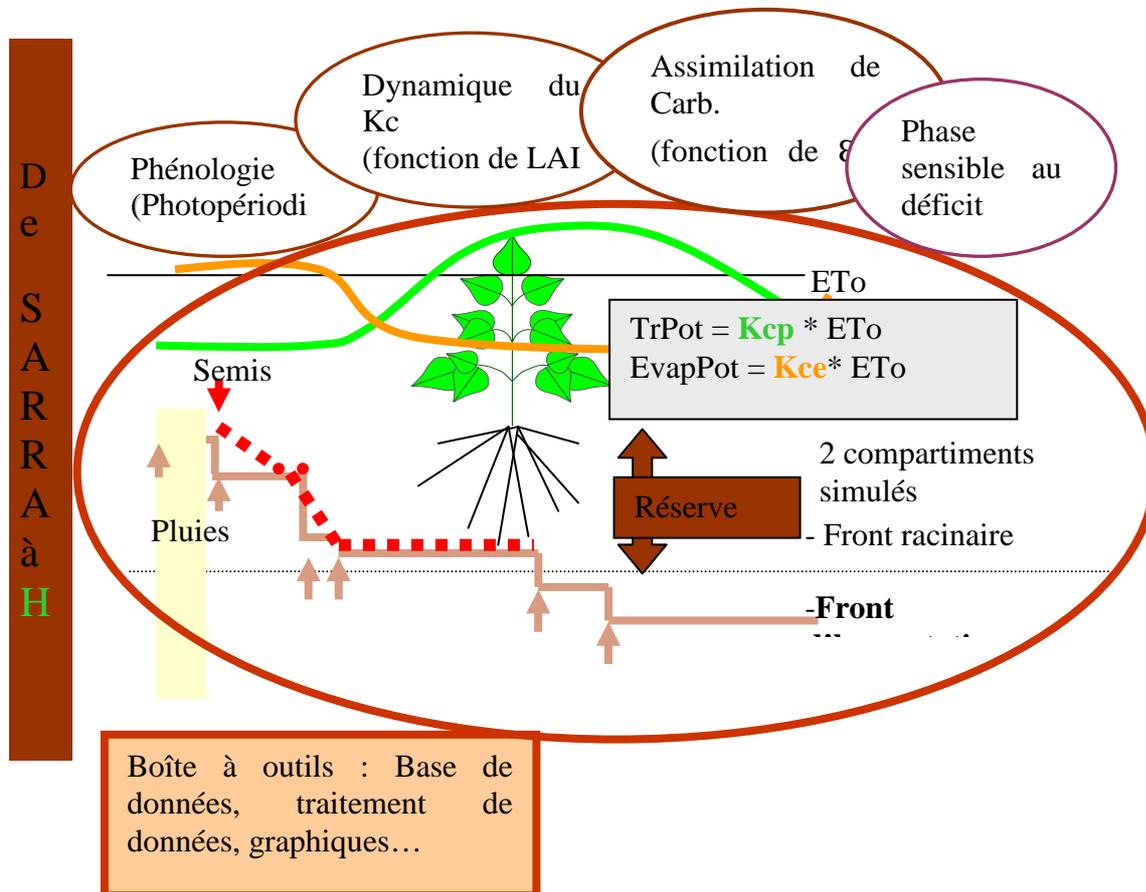


Figure 2 : Schéma d'amélioration du modèle SARRA en SARRA-H (Baron et Dingkuhn, 2003)

Avec : K_c = Coefficient cultural de la culture ; LAI = indice de surface foliaire ; E = évaporation ; T = transpiration ; ϵ_a = fraction du rayonnement photosynthétiquement actif interceptée (selon la loi de Beer) ; ϵ_b = efficacité de conversion de la fraction de lumière interceptée en matière sèche ; $TrPot$ = Transpiration potentielle ; $EvapPot$ = évaporation potentielle ; ETo = évapotranspiration de référence ; K_{cp} = part du coefficient cultural due à la transpiration de la plante ; K_{ce} = part du coefficient cultural due à l'évaporation sol.

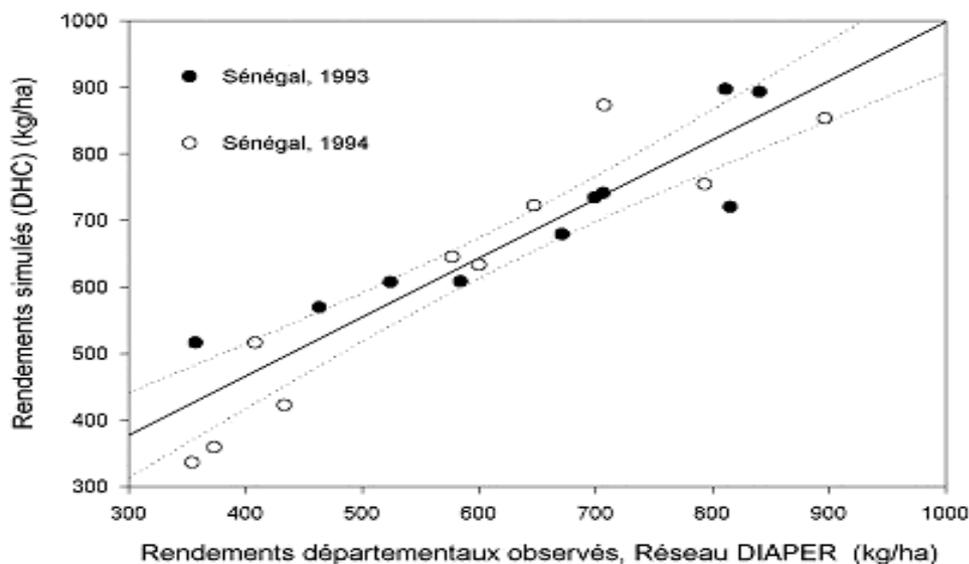


Figure 3 : Estimation du rendement : relation empirique (R) en fin de cycle entre les rendements simulés par DHC et les rendements observés au Sénégal par le Réseau DIAPER

5.2. Conception et fonctionnement du modèle SARRA-H

5.2.1. Paramètres liés au sol

Le Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques (SARRA-H) est un modèle de simulation des rendements des cultures annuelles (mil, sorgho, etc.) intégrant deux bilans de la plante et sa phénologie : le bilan hydrique et le bilan carboné.

A travers le bilan hydrique, SARRA-H prend en compte les apports d'eau (pluie et irrigation) sur la base de modèles dits de types réservoirs. Il simule le flux d'eau par un processus de remplissage, débordement de réservoirs qui symbolisent une unité homogène du sol, au regard de l'évaporation et la transpiration. Les processus de remplissage, drainage et ruissellement sont en liaison avec le sol, mais seuls les flux verticaux et descendants sont actuellement simulés par SARRA-H. Deux types de réservoirs sont retenus dans SARRA-H pour estimer l'eau disponible selon les processus d'évaporation, transpiration et stockage d'eau accessible par les racines de la plante cultivée :

- réservoir de profondeur variable en fonction du front d'humectation, il contient les racines (prof. max) et permet d'évaluer l'offre en eau pour la transpiration ;
- réservoir de surface permettant d'évaluer l'offre en eau pour l'évaporation.

Les processus de transpiration et d'évaporation sont fonction du rapport de l'offre et de la demande en eau. Ils varient en fonction de l'ET_o du milieu, du taux de couverture foliaire du sol (LAI) et des phases phénologiques de la plante. L'eau interceptée par le feuillage (surtout l'eau de pluie), peut soit rejoindre le réservoir de surface par égouttement, soit se perdre par évaporation directe, selon la température ambiante. En effet, même si elle est moins dommageable, cette eau peut atteindre dans certains cas, près de 20 % de l'apport d'eau pour des couverts végétaux importants. Chez les Poacées comme le mil et le maïs, cette eau interceptée est relativement importante à la base des feuilles, entre la gaine pétiolée et la tige. La disponibilité de l'eau apportée dépend aussi du ruissellement qui peut occasionner des pertes d'eau de 20 %, pour des pentes de sol de 1 %. Dans SARRA-H, on considère que l'évaporation s'effectue sur un réservoir superficiel de 15 à 20 cm de profondeur. Elle dépend donc de l'humidité de ce réservoir et, un coefficient "d'auto mulching" ou de "mulch" lui est affecté. Ce coefficient, encore appelé coefficient de rugosité ($K_{mulch} = ETM/ET_o$), permet de réduire l'évaporation du sol. Ainsi, l'évaporation journalière (Ev_j) se calcule de la manière suivante (en mmj) :

$$Ev_j = EvapPot \times FESW,$$

$$\text{Avec : } EvapPot = K_{mulch} \times ETo \times LTR \text{ et } FESW = (\text{Stock CR} - 0,5 \text{ Stock pF } 4,2) \times H$$

LTR = fraction de radiation non interceptée par le couvert = $[exp(-k \cdot LAI)]$ où k = coefficient d'extinction de la lumière qui est fonction des propriétés géométriques du couvert et LAI = indice de surface foliaire ; pF 4,2 = point de flétrissement permanent ; H = épaisseur du réservoir de surface ; EvapPot = évaporation potentielle (mmj^{-1}) et FESW = fraction d'eau évaporable dans le sol (en %), calculée à partir du taux d'humidité du sol (en %) à la capacité de rétention et 1/2 du taux d'humidité du sol au pF 4.2 (Allen et al., 1998).

L'évapotranspiration, dépendante du stade et de l'état de développement de la plante, s'effectue uniquement sur la profondeur du sol occupée par les racines. Elle dépend aussi de l'humidité du réservoir enraciné constitué par la fraction d'eau du sol transpirable par la plante ou "fraction of transpirable soil water" (FTSW) ou encore eau disponible pour la culture (figure 4). C'est ainsi que le modèle décompose l'évapotranspiration en évaporation du sol nu (EV_j) et transpiration foliaire (TR_j). Tous les deux facteurs évoluent en fonction de l'efficacité d'interception de la lumière, donc du LAI.

$$Tr = [K_{cmax} (1 - LTR)] \times CSTR \times ETo ;$$

$$\text{et } CSTR = FTSW / (1 - pfactor)$$

Avec :

Tr = transpiration ; K_{cmax} = coefficient cultural maximal de la plante ; LTR = fraction de radiation non interceptée par le couvert ; ETo = évapotranspiration potentielle Penman ; CSTR = correspond à un indice de contrainte hydrique du sol, déduit ici selon la méthode proposée par la FAO (Allen et al., 1998).

Ainsi, K_{cmax} peut se calculer comme suit :

$$K_{cmax} = ETR_{max} / ETo,$$

Avec : ETR_{max} = ETM x K_{cmax}, pour des ETM de l'ordre de 7 mm j⁻¹, une ETo autour de 5,7 mm j⁻¹ et un LAI maximal de 4 environ (Sarr et al., 1999 ; Anonyme, 2002).

Selon Allen et al., (1998), on peut également appliquer la méthode de calculs développée par la FAO, dite du pFactor, basée sur les notions de réserve d'eau facilement utilisable (RFU) et difficilement utilisable (RDU) définies par un point d'inflexion, si on considère que la dynamique de consommation hydrique de la plante diffère selon la demande climatique (ETo) et la fraction d'eau du sol transpirable (FTSW). En effet, pfactor est un coefficient utilisé pour le calcul du taux de transpiration et qui s'obtient en divisant la réserve d'eau du sol utilisable par les racines par la réserve totale disponible dans la zone racinaire de la plante (Allen et al., 1998). On l'obtient également par la formule suivante :

$$pfactor = parP + 0,04 \times (5 - ETM)$$

Avec : parP = paramètre spécifique à l'espèce, qui exprime le seuil critique d'humidité du sol à partir duquel le stress hydrique réduit linéairement la transpiration (Doorenbos et Kassam, 1979).

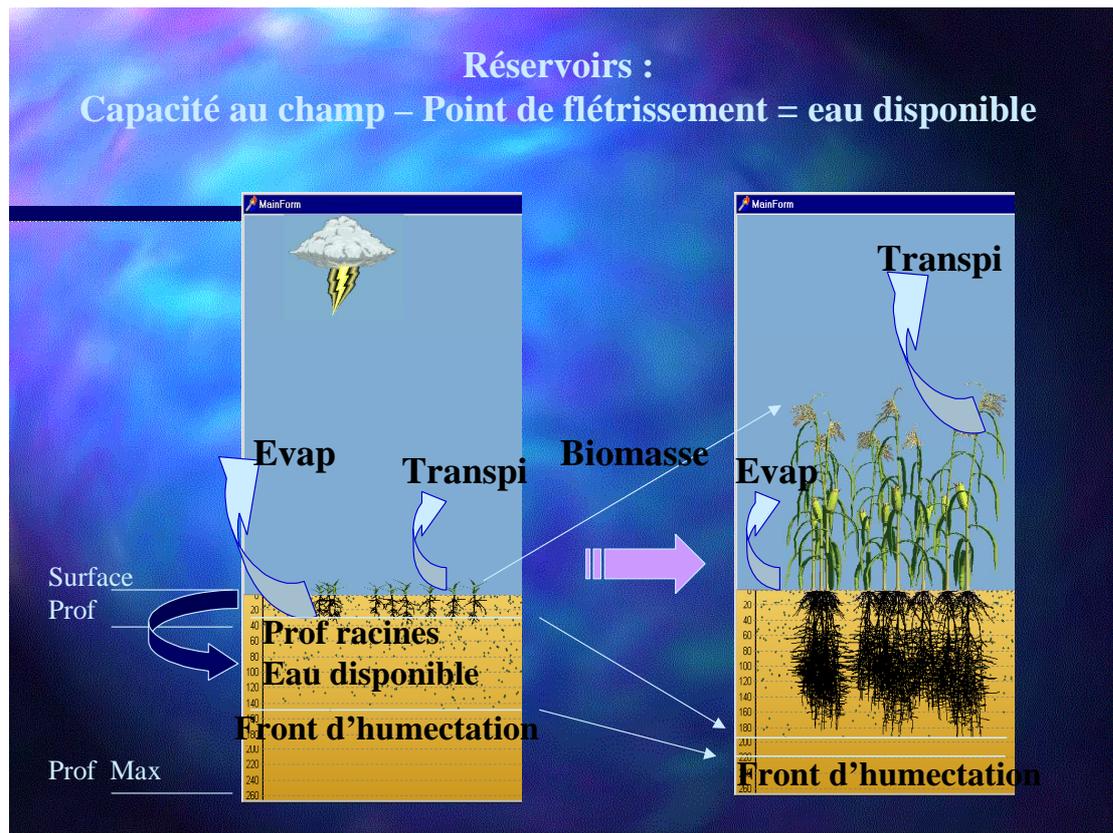


Figure 4 : Modèle de bilan hydrique à deux réservoirs (*Baron et Dingkuhn, 2003*)

5.2.2. Paramètres liés à la plante

Le modèle SARRA-H simule le bilan hydrique pour évaluer le devenir de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère. En effet, il exprime les besoins en eau du couvert végétatif du mil selon la cinétique de développement foliaire et racinaire pondéré par l'état hydrique du sol. Dans ce modèle, un couvert développé (LAI élevé) augmente les besoins en eau, et l'impact du déficit hydrique sur l'accroissement de la biomasse est traduit par un indice de satisfaction en eau de la plante ($Tr/TrPot$). Ainsi, SARRA-H tient compte des aspects suivants (Anonyme, 2002) :

- l'assimilation du carbone (modèle de bilan carboné) selon les processus : d'interception de la part photosynthétiquement active de l'énergie lumineuse en fonction du taux de couverture foliaire ($1-Ltr$) selon la loi de Beer (ϵ_a) et de conversion de la fraction de lumière interceptée en matière sèche. A cet effet, un coefficient génétique (ϵ_b) de conversion de l'énergie interceptée, dépendant de la transpiration relative de la plante, est utilisé pour la simulation du gain journalier de biomasse (Biomgain). La biomasse cumulée correspond à la biomasse totale (Biomtot).

$$\mathbf{BiomGain = 0,5 \times RG \times (1-LTR) \times (\epsilon_b) \times 10 \times (Tr/TrPot) - RespMaint}$$

$$\mathbf{Biomtot_j = Biomtot_{j-1} + Biomgain_j}$$

Avec:

$RG =$ radiation solaire en $MJ m^{-2} j^{-1}$; $LTR =$ fraction de radiation non interceptée par le couvert; $Tr/Trpot =$ transpiration réelle/transpiration potentielle = niveau de stress hydrique physiologique; $\epsilon_b =$ efficacité de conversion de la radiation interceptée en $g MJ^{-1} j^{-1}$,
 $RespMaint =$ respiration de maintenance; $10 =$ facteur de conversion pour obtenir des $kg ha^{-1} j^{-1}$ à partir de RG en $MJm^{-2}j^{-1}$ et $Kepsib$ en $gMJ^{-1}j^{-1}$.

- la densité de semis ajustée par le taux de levée pour simuler la densité de population. L'impact de la densité de semis sur le LAI est ainsi pris en compte dans le modèle SARRA-H qui tient aussi compte de la valeur initiale de biomasse (Biominitot, en $kg ha^{-1}$) dépendante de la densité du semis (nombre de grains ha^{-1} germés), de la fraction de réserves mobilisables dans les grains et du poids sec moyen d'un grain.
- la dynamique d'évolution de la biomasse totale en fonction des phases phénologiques et de sa répartition entre les organes racinaires et aériens (feuilles, tiges, épis, grains). Une approche allométrique et empirique est utilisée pour calculer la partition de la biomasse totale (racines, feuilles) pour rendre le modèle moins complexe et plus robuste. Ainsi, partant de la relation linéaire existante entre le rapport biomasse feuille (Biomfeuille) / biomasse aérienne (BiomAéro) et la biomasse aérienne selon les stades de développement des céréales (Dingkuhn *et al.* 1999), la biomasse foliaire était déduite de la biomasse aérienne.

- le modèle SARRA-H gère la phénologie par la prise en compte des phases phénologiques classiques du développement des céréales (figure 5) : phase végétative (BVP), phase sensible au photopériodisme (PSP), phase reproductive (RPR), phase de maturation des graines (MAT). La phase qui s'étend de la RPR au 2/3 de MAT est prise comme phase pendant laquelle un déficit hydrique a un effet dépressif sur le rendement. Toutes les phases sont considérées comme ayant une durée constante et sont exprimées en temps thermique (Somtemp), sauf la PSP variable en fonction de la sensibilité de la variété à la photopériode (Alagarswamy *et al.*, 1998).

$$\text{Somtemp} = \sum [(T_{\max} + T_{\min})/2 - T_{\text{base}}]$$

Avec : T_{\max} et T_{\min} = température maximale et minimale, T_{base} = température de base (≈ 11 °C pour le mil).

- le modèle SARRA-H gère la mise en place de la surface foliaire à travers l'indice de surface foliaire (LAI) déduit de la biomasse foliaire, en fonction de la surface massique des feuilles ou "specific leaf area" (SLA) qui varie avec le stade de développement ainsi que l'âge et l'épaisseur de la feuille (Dingkuhn *et al.* 1999). La SLA des feuilles est un caractère variétal pouvant avoir des valeurs minimales et maximales (SLA_{max} et SLA_{min}).

$$\text{LAI} = \text{SLA} \times \text{Biomfeuille}$$

- pour les composantes du rendement, SARRA-H tient compte du potentiel génétique du rendement de la plante qui est déduit d'une fraction fixe de la biomasse aérienne. Ce potentiel, dépendant de l'état de la plante surtout pendant la phase reproductive, est souvent exprimé par l'indice de rendement ou "Harvest Index" (HI). Ainsi, le rendement potentiel est obtenu par la différence des biomasses entre les stades de la floraison (BiomTotStadeRPR) et d'initiation paniculaire (BiomTotStadeIp) multiplié par un coefficient (Krdt) que l'on peut déduire de cet indice de récolte.

$$\text{RdtPot} = \text{kRdt} \times (\text{BiomTotStadeRPR} - \text{BiomTotStadeIp})$$

Avec: RdtPot = rendement potentiel

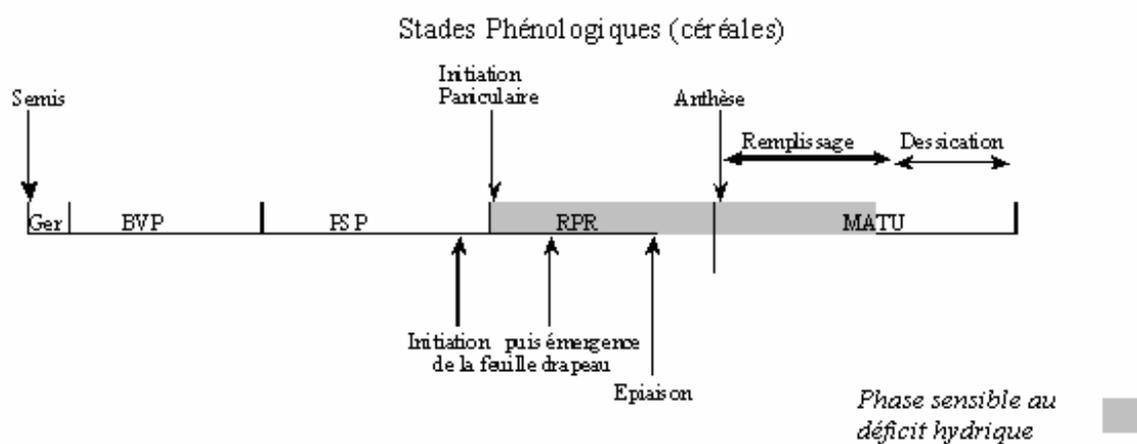


Figure 5 : Stades phénologiques des céréales

Avec : Ger = phase de germination, BVP = "basic vegetative period" ou phase végétative de base, PSP = phase sensible à la photopériode, RPR = "reproductive period" ou phase reproductive et Matu = phase de maturation).

Du fait qu'à partir de la formation des grains, la production de biomasse s'oriente en priorité vers les grains, le gain journalier en grain répond à un principe de compétition entre l'offre (gain journalier de biomasse) et la demande (croissance des grains).

Ainsi, si l'offre (BiomGain) est supérieure à la demande, le rendement réel en grains est considéré égal au rendement potentiel (DayRdtPot) et le reste de l'offre est orienté vers les feuilles et les tiges. Par contre, si BiomGain est inférieur à la demande (DayRdt) pour la croissance des grains, il n'y a pas de croissance végétative et le déficit (Restcrois) est comblé par une réallocation des réserves (Krealloc) vers les graines au détriment des feuilles. Cette réallocation est toujours inférieure au manque d'assimilat (Krealloc) :

$$\mathbf{Restcrois = BiomGain - DayRdtPot}$$

Si Restcrois est supérieur ou égal à 0, alors DayRdt = DayRdtPot ; Sinon, DayRdt = BiomGain - Restcrois x Krealloc

C'est ainsi que l'évolution du rendement est calculée par la relation suivante :

$$\mathbf{Rdt_j = Rdt_{j-1} + DayRdt_j}$$

C'est sur cette base que le modèle SARRA-H simule les rendements potentiels (rendements obtenus dans des bonnes conditions agronomiques en station) et les rendements réels (obtenus en milieu paysan) des cultures céréalières comme le mil. La caractérisation du développement de la culture a ainsi été établie sur des données expérimentales obtenues pour la plupart dans des conditions optimales de culture. Les données ont été traduites en coefficients qui sont intégrés dans le modèle comme paramètres de calage. De ce fait, le modèle présente des insuffisances au vue des pratiques et conditions culturales réellement rencontrées en milieu paysan (contraintes hydriques, minérales, maladies, etc.). Pour corriger cette insuffisance dans la simulation des rendements réels, le modèle fait essentiellement appel au coefficient (ϵ_b) ou facteur de conversion de l'énergie interceptée en matière sèche, qui est supposé variable en fonction du statut azoté de la plante (teneur en azote des feuilles). En effet, le modèle utilise des coefficients empiriques de frein du milieu réel modifiant ϵ_b tout au long du cycle de développement de la plante. Dans la conception du modèle, ces coefficients définis en station étaient supposés prendre en compte l'impact des contraintes agroclimatiques qui influencent les rendements de la culture. Cependant, l'extensibilité de leur validité à toutes les conditions et pratiques culturales rencontrées en milieu paysan (variétés, fertilisation du sol, etc.) reste encore à démontrer. D'où la nécessité de l'évaluer dans des conditions différentes, afin de mieux fiabiliser ses simulations.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

Les essais agronomiques ont été implantés dans le domaine du CRA de Niamey (13° 29' Nord et 02° 10' Est) au Niger, pendant les saisons pluvieuses 2002 et 2003, et dans celui du CNRA de Bambey (14.42° Nord et 16.28° Ouest) au Sénégal, pendant la contre-saison 2004. Le choix de ces deux sites et des traitements contrastés qui y sont appliqués aux différentes variétés testées, était basé sur l'objectif d'obtenir une large gamme de variation des processus de développement et de croissance de la culture du mil, dans des conditions agroclimatiques différentes. Les mesures prévues à cet effet sont faites pour évaluer l'impact des pratiques culturales (date de semis, niveau de fertilisation, densité de semis et régime hydrique) sur la variation de la biomasse aérienne dont dépendent les besoins hydriques de la culture.

Chapitre 6 : Expérimentations au CRA (Niger)

6.1. Conditions physiques du milieu d'étude

6.1.1. Climat

Le climat est du type sahélien. Il est très dépendant des mouvements de masse d'air de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et est caractérisé par :

- une alternance annuelle de deux saisons distinctes :
 - une courte saison de pluie, dont la longueur varie de 60 à 150 jours en moyenne, selon les zones agroclimatiques du Niger. Elle correspond à la période de croissance des cultures pluviales. A Niamey, ville située dans la zone soudano-sahélienne, les pluies démarrent vers mi-juin en moyenne, et se terminent vers mi-septembre (Sivakumar, 1989b et 1992 ; Amadou, 1994).
 - une longue saison sèche qui s'étend sur tout le reste de l'année.
- une pluviométrie très variable dans le temps et dans l'espace. Selon Amadou (1994) le coefficient de variation temporelle de la pluviométrie varie de 15 à 30 %. Il existe un fort gradient nord-sud des pluviosités annuelles (figure 6). Plusieurs auteurs (Sivakumar, 1989b ; Sivakumar et Hatfield, 1990 ; Traoré *et al.*, 2000b ; Diouf, 2000) ont constaté une diminution générale des pluviosités annuelles au Sahel, se traduisant par un déplacement des isohyètes vers le sud (figure 6). Outre les variations interannuelles, la pluviométrie sahélienne connaît également des fluctuations intra annuelles relativement fortes ces dernières années. Les saisons des pluies sont souvent caractérisées par l'occurrence d'épisodes secs de durée assez longue, qui se répercutent, dans la plupart des cas, négativement sur les rendements des cultures.

- un rayonnement global très élevé. Selon Begué (1991), il est de 19,45 MJ en moyenne annuelle à Niamey pour la période 1979-1988 et de 19,65 et 19,36 MJ respectivement pendant la saison des pluies et la saison sèche. Amadou (1994) a estimé le rayonnement global mensuel à $21 \text{ MJ}^{-1} \text{ m}^2 \text{ j}^{-1}$ en moyenne à Banizoumbou, un village situé à 65 km à l'Est de Niamey (13°31 Nord ; 2°39 Est) et a souligné qu'il est très peu variable le long de l'année. Les variations mensuelles du rayonnement global ont deux minima : juillet- août et décembre-janvier.
- une photopériode variable selon les jours de la saison. Pour le site d'expérimentation du CRA (13° 29 Nord et 02° 10 Est), des calculs faits avec le logiciel SANJI (Koné *et al.* 1992), montrent que la durée théorique du jour varie entre 12 h 47 min (2^e décade de juin) et 11 h 58 min (3^e décade de septembre). Cet écart de 49 min ne tient pas compte de la couverture nuageuse (importante en juillet-août) qui permet d'observer des durées réelles d'insolation de 9 h 42 min (2^e décade de mai), 7 h 24 min (2^e décade de juillet) et 8 h 54 min (2^e décade de septembre). Ces valeurs sont des moyennes décadaires recueillies sur la station météorologique de Niamey aéroport, pour la période 1971-1991.
- une température de l'air qui est dépendante du rayonnement global et du bilan énergétique. Elle présente des variations saisonnières en fonction du régime hydrique et de l'état de végétation de la surface du sol. Au Sahel, l'air connaît trois niveaux de changement de sa température dans l'année. Il est plus chaud et sec de mars à mai, moins chaud et humide de juin à octobre et frais et sec de novembre à février. Quant à l'humidité relative de l'air, elle présente un minimum en janvier-février et un maximum en août (Amadou, 1994).
- une alternance de deux régimes de vents :
 - l'harmattan, vent de saison sèche venant du Nord-Est. Il est continental, chaud et sec, souvent chargé de poussière et soufflant avec des vitesses de l'ordre de 4 à 5 m s^{-1} ;
 - la mousson, vent de saison humide qui vient du Sud-Ouest. Il est maritime, humide et souffle souvent avec de fortes intensités mais de courte durée, lors des passages des fronts des lignes de grains pendant la saison de pluies (Amadou, 1994).

6.1.2. Sol et conditions pluviométriques du site d'expérimentation

Le domaine du CRA couvre une superficie de 70 ha et se caractérise par des sols sableux profonds à peu profonds (1,80 m – 1,20 m) recouvrant des couches stratifiées des sols de levées à texture graveleuse, sableuse ou argileuse et limoneuse. L'analyse physique des sols dans la ferme expérimentale de ce Centre a donné le pourcentage le plus élevé en sable

grossier (755 g kg^{-1} à 859 g kg^{-1}), contre seulement 77 g kg^{-1} à 106 g kg^{-1} pour le sable fin, 13 g kg^{-1} à 62 g kg^{-1} pour le limon et 50 g kg^{-1} à 76 g kg^{-1} pour l'argile (Denis *et al.*, 1984). Les sols cultivés du CRA présentent très peu de matière organique ($0,15 \text{ g kg}^{-1}$ à $2,4 \text{ g kg}^{-1}$ de carbone et $0,03 \text{ g kg}^{-1}$ à $0,27 \text{ g kg}^{-1}$ d'azote), mais ceux laissés en jachère pendant plusieurs années peuvent être relativement fertiles. Selon Denis *et al.* (1984), ces sols peuvent avoir une très bonne fertilité, mais deviennent rapidement très mauvais avec les variations de pH allant de 7 à 5,5. Ils réagissent très bien aux engrais azotés et présentent des réactions variables aux engrais phosphatés, ceci en fonction de leur richesse en phosphore. De par leur pauvreté en matière organique, ces sols présentent une structure quasiment mauvaise et assez compacte.

Les essais agronomiques de cette étude ont été implantés sur ces sols ainsi caractérisés, pendant deux saisons hivernales 2002 et 2003. La grande variabilité des facteurs climatiques au Sahel a fait que la saison 2002 a été caractérisée par des pluies dont la répartition a été différente de celle de 2003 (figures 7 et 8). En effet, les deux saisons ont eu un démarrage qui correspond bien à l'intervalle moyen de la première quinzaine du mois de juin antérieurement défini par Sivakumar (1989b) à partir des données historiques. Cependant en 2002, les pluies ont connu une distribution très irrégulière caractérisée par des épisodes secs dont les plus longs ont été observés en juillet ($20 - 33^{\circ}$ JAS), août ($48 - 58^{\circ}$ JAS) et septembre ($68 - 80^{\circ}$ JAS) (figure 7).

La pluviométrie 2003 a été plus régulière que celle de 2002, mais caractérisée par un arrêt très précoce des pluies, à partir du 20 septembre au 99° JAS (figure 8). Cette figure montre qu'en 2003, la fréquence des pluies a été assez bonne pour éviter à la culture de souffrir de déficit hydrique. La figure 9 compare les précipitations décennales 2002 et 2003 avec les quantités de pluies obtenues aux fréquences 25 %, 50 % et 75 % sur la période 1971-2000, pour illustrer les irrégularités et les similitudes pluviométriques de ces deux années par rapport aux fréquences de référence. Cette figure montre que les déficits pluviométriques observés en juillet et août 2002, ainsi que les pluies tardives recueillies en octobre (jusqu'au 120° JAS) de la même année, ont constitué des événements inattendus, par rapport aux données historiques sur la période 1971-2000. Les expérimentations ont été ainsi menées en 2002 sous un cumul pluviométrique de 486 mm recueilli de mai à octobre, contre un cumul de 531 mm enregistré de mai à septembre en 2003.

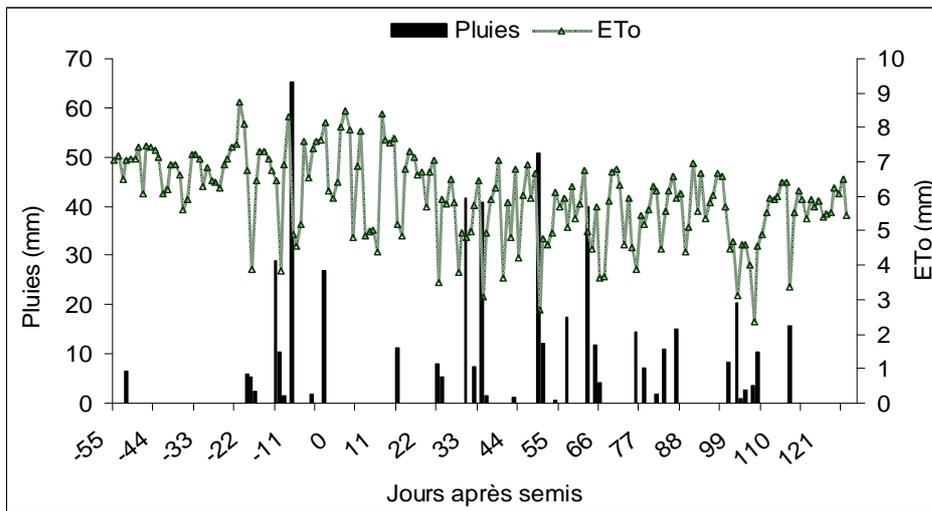


Figure 7 : Pluviométrie et évapotranspiration de référence (ETo) journalières en 2002 au Centre Régional Agrhymet, Niamey

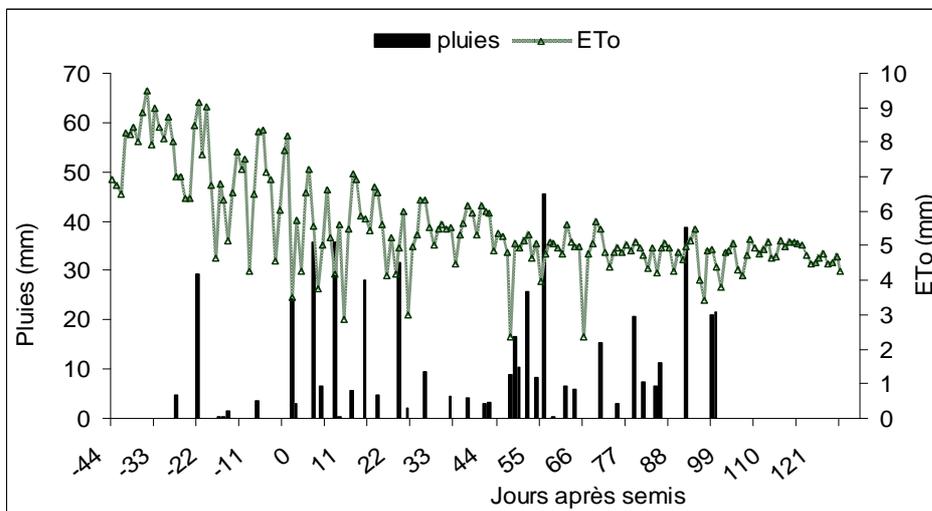


Figure 8 : Pluviométrie et évapotranspiration de référence (ETo) journalières en 2003 au Centre Régional Agrhymet, Niamey

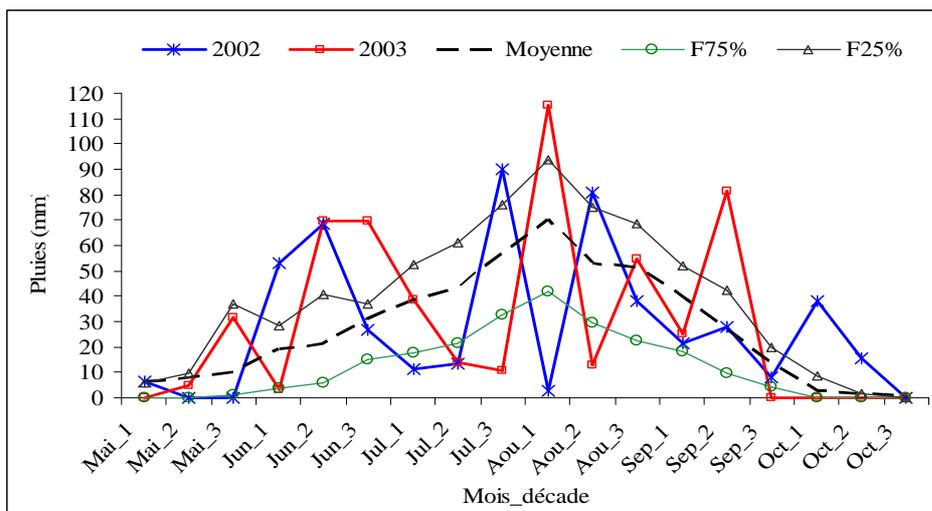


Figure 9 : Pluviométries décadaires 2002 et 2003 (Centre Régional Agrhymet, Niamey) comparées aux fréquences 75 %, 25 % et la médiane de la période 1971-2000 (Niamey aéroport).

6.2. Matériel végétal

Le matériel végétal de l'étude est le mil (*Pennisetum glaucum* [L.] R.Br), une plante céréalière communément appelée petit mil ou millet, dont le cycle de développement est très variable selon la variété : variétés hâtives (75 à 90 jours), variétés semi-tardives (95 à 110 jours) et variétés tardives (120 à 150 jours). Pour tenir compte de cette diversité des cycles variétaux, trois variétés de mil ont été choisies dans le cadre de cette étude selon leur degré d'adoption dans les trois principales zones agroclimatiques du Niger (zone soudanienne, soudano-sahélienne et sahélienne). Il s'agit de :

- la variété HKP, localement appelée Haini-Kirei précoce (90-95 jours). Elle a été développée par l'Institut National de la Recherche Agronomique du Niger (INRAN) et améliorée par sélection massale par grille (GMS) pendant quatre générations par l'ICRISAT. C'est une variété à épis longs (55 à 60 cm) largement vulgarisée dans toutes les zones milicoles du Niger. Elle est plus particulièrement adaptée à la zone Nord sahélienne du Niger où son rendement potentiel en grains atteint 1300 à 1800 kg ha⁻¹.
- la variété ZATIB (100-105 jours) qui est dérivée d'un croisement effectué par l'INRAN entre deux variétés localement appelées Zanfarwa et Tchinin Bajini dans la région de Maradi au Niger. C'est une variété semi-tardive qui est vulgarisée et cultivée dans les zones assez bien arrosées du Niger. Elle se caractérise par des épis aussi longs, mais un peu plus gros que ceux de la HKP. Elle est mieux adaptée à la zone Sud sahélienne et offre un rendement potentiel en grains généralement plus élevé que celui de la HKP (1500 à 2000 kg ha⁻¹)
- la variété MTDO qui est une variété très tardive (120 à 150 jours) adaptée à la zone Nord soudanienne. Elle donne des épis qui sont plus longs que ceux de la HKP et de la ZATIB (85 à 95 cm). Elle présente le meilleur rendement potentiel en grains (2000 à 2500 kg ha⁻¹) de toutes les variétés de mil cultivées au Niger, si toutefois la durée de la saison des pluies lui permet de boucler son cycle dans des bonnes conditions hydriques.

6.3. Méthodes

Trois différents types d'essais ont été implantés dans le domaine du CRA en 2002 et reconduits en 2003 pour étudier les variations de la biomasse aérienne (feuilles, tiges, épis et grains) des variétés retenues sous les effets respectifs de la date de semis, de l'apport d'urée et de l'interaction entre la densité de semis et l'apport d'urée. Au semis, toutes les semences ont été traitées par un insecticide-fongicide « thioral » à la dose de 25 g pour 10 kg de semences.

L'objectif global visé dans la conduite de ces essais était de mieux caractériser les variations des besoins en eau du mil, en fonction des fluctuations qu'occasionnent les techniques culturales les plus pratiquées en milieu paysan sahélien, dans la productivité de cette culture. Ces essais permettront également d'évaluer les conséquences des recommandations faites en vue d'augmenter et de sécuriser la production agricole dans les pays sahéliens, à savoir l'intensification (choix variétal, fertilisation, densité de semis) et le calage des cycles variétaux par rapport aux différentes dates de démarrage de la saison des pluies.

6.3.1. Test variétal vis-à-vis du décalage de la date de semis

Le champ d'expérimentation était une bande de 150 m de longueur et 23 m de largeur. L'essai a été installé dans les conditions hydriques uniquement pluviales, sans labour du sol avant le semis. Il a concerné les trois variétés de mil (HKP, ZATIB et MTDO) qui ont été semées à deux dates différentes décalées de 28 jours en 2002 et de 21 jours en 2003 (dans le protocole d'essai, il était prévu 20 jours de décalage entre les deux dates de semis, mais du fait qu'il fallait toujours attendre une pluie pour semer, cela n'a pas été respecté).

Ce décalage a été envisagé pour tenir compte des effets éventuels du photopériodisme et du changement de la demande atmosphérique avec l'installation de l'hivernage, sur l'accumulation de la biomasse aérienne et les rendements des différentes variétés. Les traitements appliqués devraient également permettre d'évaluer les variations des cycles variétaux en fonction de la date de semis, donc des conditions de prévalence des facteurs climatiques (durée d'insolation, température, pluies) connus très variables selon la période de la saison.

Les deux dates de semis ont été mises en place le 24 juin et le 22 juillet en 2002, et le 03 et 24 juillet en 2003 (annexe 1). Notons cependant qu'en 2003, le 1^{er} semis a été fait le 13 juin, mais du fait que cette campagne a connu un démarrage difficile dû à une grande mortalité des plants après la levée, le semis a été entièrement repris le 03 juillet 2003.

L'essai a été conduit en Split-plot avec les dates de semis en blocs et les variétés en petites parcelles. Il comportait 3 répétitions de deux dates de semis pour chaque variété. La répétition comptait ainsi 6 parcelles élémentaires de 12 m sur 5 m (soit 60 m² de surface) séparées entre elles par des allées de passage de 2 m de large. Les poquets étaient équidistants de 1 m de part et d'autres, soit une densité de semis de 10 000 poquets de 2 plants ha⁻¹ = 20 000 plants ha⁻¹. Chaque parcelle comprenait deux parties, l'une réservée au suivi phénologique (dates d'épiaison, de floraison et de maturité complète) et à la détermination des composantes du rendement (pailles, épis, grains) et l'autre aux mesures destructives par des prélèvements, tous les 15 jours, d'échantillons de biomasse fraîche, pour la mesure de la surface foliaire et le suivi de l'évolution de la matière sèche accumulée.

6.3.2. Test variétal vis-à-vis de l'apport d'urée

Le champ d'expérimentation a les mêmes dimensions que celui de l'essai précédent. Les mêmes variétés de mil utilisées ont été soumises, dans cet essai, à deux niveaux de fertilisation azotée (la dose N0 = 0 kg ha⁻¹ et celle recommandée par la recherche : N1 = 100 kg ha⁻¹ d'urée).

Dans cet essai, le facteur principal de variation de la biomasse aérienne étudié est la fertilisation azotée. Le choix de ces traitements d'urée a été fondé sur le fait qu'il se pose actuellement au Sahel des problèmes d'épuisement des éléments nutritifs et de la productivité des sols. Il s'agit des problèmes liés à un système économique (pauvreté) ne permettant pas aux paysans d'appliquer partout les doses d'engrais chimiques recommandées pour équilibrer les déficits en nutriments. L'objectif visé à travers cet essai était de collecter des données, pour des variations de fertilité du sol proches de celles réellement existantes en milieu paysan.

L'essai a été conduit en Split-plot avec la dose d'urée en sous-blocs et la variété en petites parcelles. Il a comporté 3 répétitions de 6 parcelles élémentaires (2 doses d'urée x 3 variétés) mesurant 12 m sur 5 m de dimensions, et séparées entre elles par des allées de passage de 2 m. Dans chaque parcelle élémentaire les mêmes mesures et observations que dans le précédent essai sont réalisées. La densité de semis était aussi la même. Les trois variétés soumises aux doses d'urée ont été randomisées à l'intérieur de chaque répétition. Des détails sont donnés en annexe 2 sur les différentes opérations culturales effectuées dans cet essai.

Les traitements contrastés d'urée ont été effectués en deux tranches égales, dont une première moitié au démariage et l'autre à la montaison (tableau VI). L'apport d'urée a été fait localement autour des pieds de mil en ramenant par proportionnalité les tranches initialement définies par hectare à l'échelle de la parcelle élémentaire (60 m²). Ensuite, la dose définie pour chaque parcelle élémentaire a été divisée par le nombre de poquets se trouvant dans la parcelle, afin d'obtenir la quantité d'urée (en g) à apporter localement à chaque poquet. Le tableau VI résume le fractionnement utilisé dans cette opération de fertilisation en fonction des différents traitements de l'essai. Pour une raison de précision dans le fractionnement, les quantités d'urée à apporter par poquet ont été souvent arrondies à des valeurs entières et faciles à peser. Ainsi, en lieu et place de la dose de 100 kg ha⁻¹ d'urée initialement prévue pour le traitement non nul, nous avons finalement utilisé 104 kg ha⁻¹.

6.3.3. Test de la variété ZATIB vis-à-vis des effets de l'urée et de la densité de semis

Ce test a été fait, non seulement dans les champs pluviaux stricts, mais aussi dans ceux équipés d'un dispositif d'irrigation (communément appelés périmètre irrigué au CRA). Ceci, afin de mesurer les effets des traitements appliqués, dans deux conditions hydriques :

conditions pluviales strictes et en conditions d'irrigations complémentaires. Les champs irrigués sont des bandes parallèles de dimensions réduites à 30 m sur 20 m.

L'essai a concerné une seule variété de mil ZATIB (à cycle intermédiaire entre ceux de la HKP et de la MTDO) qui a été testée vis-à-vis des effets de deux densités de semis ($D1 = 1,20 \times 1 \text{ m}$ et $D2 = 0,80 \times 1 \text{ m}$ (soit $D1 = 8333$ poquets de 2 plants $\text{ha}^{-1} = 16666$ plants ha^{-1} et $D2 = 15625$ poquets de 2 plants $\text{ha}^{-1} = 31250$ plants ha^{-1}) associées aux doses $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée. Les traitements qui résultent des différentes combinaisons de densité de semis et d'apport d'urée sont les suivants :

- $D1N0$ = densité de 16 666 plants ha^{-1} avec 0 kg ha^{-1} d'urée,
- $D1N1$ = densité de 16 666 plants ha^{-1} avec 100 kg ha^{-1} d'urée,
- $D2N0$ = densité de 31 250 plants ha^{-1} avec 0 kg ha^{-1} d'urée,
- $D2N1$ = densité de 31 250 plants ha^{-1} avec 100 kg ha^{-1} d'urée.

Ces traitements ont été déterminés de façon qu'ils soient susceptibles d'entraîner une large gamme de variation de l'indice de surface foliaire dont dépendent étroitement les besoins en eau et les rendements de la variété testée.

Les deux composantes (pluviale stricte et irriguée) de l'essai ont été mises en place avec un important retard en 2002, à cause du problème de labour avant semis. L'essai a été implanté sur un dispositif factoriel en blocs randomisés dont les deux facteurs sont la dose d'urée et la densité de semis. L'essai a été conduit en 3 répétitions comptant chacune 4 parcelles élémentaires de 12 m sur 5 m en conditions pluviales strictes. En conditions d'irrigations complémentaires, chaque répétition comprenait également 4 parcelles élémentaires de 8 m sur 12 m. Les parcelles ont été réservées aux mêmes observations et mesures qu'en pluvial strict. Les différentes opérations culturales sont inventoriées dans l'annexe 3. Les plants ont reçu des traitements contrastés d'urée apportée également en deux tranches par la même procédure que dans le précédent essai, tout en tenant compte cette fois-ci de la variation de la densité de semis. Les tableaux VII et VIII résument le fractionnement utilisé pour les apports d'urée en fonction des différents traitements aussi bien en conditions pluviales strictes qu'en irrigations complémentaires.

Les irrigations complémentaires ont été assurées par un système de billons rectilignes et équidistants d'un mètre, mis en place avant le semis pour canaliser l'eau d'irrigation. Les billons étaient orientés dans le sens de la largeur de chaque bande et le semis était fait sur leurs flancs, de façon à maintenir les variations de densité de semis dans le sens de la longueur de la bande.

Tableau VI : Détail sur les tranches d'urée apportées par poquet et par traitement. Essai Doses d'urée x variétés. Agrhymet, 2002 et 2003.

Traitement	Dose prévue (kg/ha/trt)	Fraction (g)/parcelle élé. (30 m ²)	Nbre de poqs/ parcelle élé.	Fraction / poq	Fraction (kg/ha)/tranche	Dose apportée/ ha
N0	0 kg	0 g	78	0 g	0 kg	0 kg
N1	100 kg	312 g	78	4 g	52 kg	104 kg

Tableau VII : Détail sur la détermination des tranches d'urée apportées par poquet et par traitement en conditions hydriques pluviales strictes. Essai Doses d'urée x Densités de semis. Agrhymet, 2002 et 2003.

Traitement	Dose prévue (kg/ha/trt)	Fraction/ parcelle élé. (g)	Nbre de poqs/ parcelle élé.	Fraction/ poq. (g)	Fraction (kg/ha) /tranche	Dose apportée/ha
N0D1	0	0	66	0	0	0
N0D2	0	0	96	0	0	0
N1D1	100	297,0	66	4,5	49,5	99,0
N1D2	100	297,6	96	3,1	49,6	99,2

Tableau VIII : Détail sur la détermination de la tranche d'urée apportée par poquet et par traitement en conditions d'irrigations complémentaires. Essai Doses d'urée x Densités de semis. Agrhymet, 2002 et 2003.

Traitement	Dose prévue (kg/ha/trt)	Fraction/ parcelle élé. (g)	Nbre de poqs/ parcelle élé.	Fraction/ poq. (g)	Fraction (kg/ha)/tranche	Dose apportée/ha
N0D1	0	0	91	0	0	0
N0D2	0	0	123	0	0	0
N1D1	100	473,2	91	5,2	49,3	98,6
N1D2	100	492,0	123	4,0	51,3	102,6

Les irrigations complémentaires sont effectuées, seulement en cas de persistance d'un épisode sec entraînant le flétrissement des plants à midi. Dès qu'un début de flétrissement était constaté, une irrigation était systématiquement déclenchée à l'aide d'un tuyau de 4 cm de section et 33 m de longueur. Le débit moyen de l'eau acheminée par le tuyau et la durée de l'opération sont notés au niveau de chaque canal de billons, afin de déterminer la quantité totale d'eau fournie aux plants par séance. Ainsi, deux irrigations ont été effectuées pendant chacune des saisons (le 14 août et le 05 septembre en 2002 ; le 23 juillet et 01 août en 2003) pour apporter à chaque fois 17 mm d'eau.

6.3.4. Mesures et observations

La plupart des observations et mesures ont été communes aux trois essais et ont été effectuées sur un calendrier établi sur la durée du cycle de chaque variété, de la levée à la récolte. Elles ont porté sur le suivi des différents paramètres liés au sol (humidité et évaporation du sol), à la croissance et au développement de la plante (hauteur, surface foliaire, matière sèche et phénologie) et au climat (pluies, température, insolation, humidité relative et vitesse du vent). Les mesures et observations portant sur les variations de l'humidité et de l'évaporation du sol ont été faites uniquement dans les composantes (pluviale et irriguée) de l'essai apport d'azote x densité de semis.

- **Mesures des paramètres climatiques**

Une station météorologique automatique a été installée non loin des essais pour mesurer, aux pas de temps horaires et journaliers, les paramètres météorologiques entrant dans le calcul de l'ET_o (température minimale et maximale, humidité relative minimale et maximale, rayonnement global, vitesse du vent) et pluie (figure 10). Les ET_o journalières ont été calculées par la méthode FAO Penman-Monteih (Allen *et al.*, 1998) :

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Avec : ET_o = évapotranspiration de référence [mm jour⁻¹], R_n = radiation nette interceptée par la surface foliaire [MJ m⁻² jour⁻¹], G = densité de flux de chaleur [MJ m⁻² jour⁻¹], T = température de l'air à 2 m [°C], U₂ = vitesse du vent à 2 m [m s⁻¹], e_s = tension de vapeur à la saturation [kPa], e_a = tension réelle de vapeur [kPa], e_s - e_a = déficit de saturation [kPa], Δ = pente de la courbe de tension de vapeur [kPa °C⁻¹], γ = constante psychrométrique [kPa °C⁻¹].

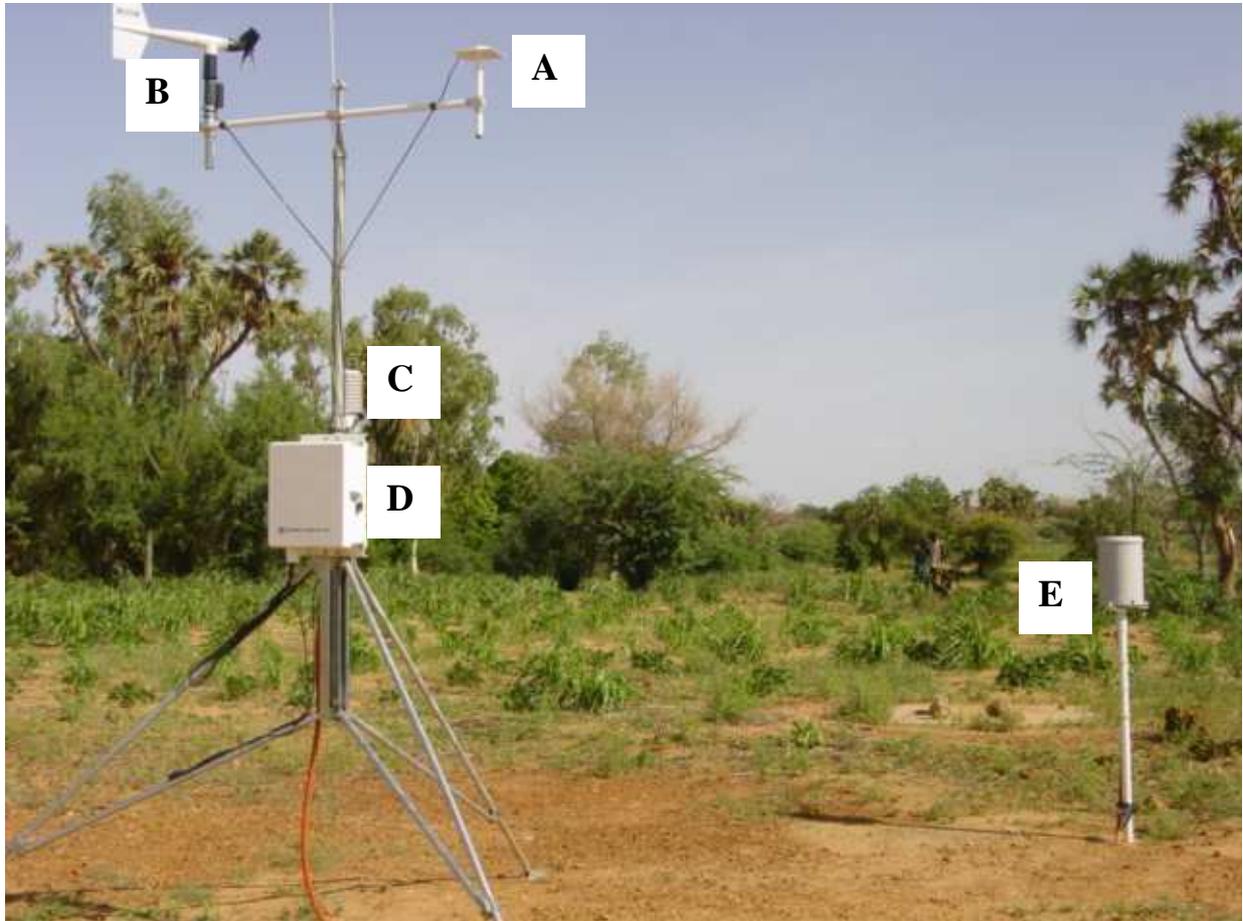


Figure 10 : Station météorologique automatique au Centre Régional Agrhymet (Conf. Campbell scientific)

- *A = pyranomètre (radiation solaire), avec une erreur de mesure d'au maximum $\pm 5\%$;*
- *B = Anémo-girouette (vitesse et direction du vent), avec des erreurs de mesure de $\pm 0,4 \text{ m s}^{-1}$ pour la vitesse et de $\pm 4^\circ$ pour la direction du vent ;*
- *C = capteur de température et de l'humidité de l'air, avec des erreurs de mesure de $\pm 1,5^\circ\text{C}$ pour la température et de ± 3 à 6% pour l'humidité de l'air ;*
- *D = Centrale d'acquisition des données ;*
- *E = pluviomètre.*

Les durées des phases phénologiques et du cycle de la culture ont été exprimées en terme de cumul des températures journalières traduites en degrés jour selon la formule (Baron et Dingkuhn, 2003) :

$$T \text{ (degrés jours)} = \sum[(T_{\max}+T_{\min})/2-T_{\text{base}}]$$

Avec T_{\max} = température maximale du jour ; T_{\min} = température minimale du jour et T_{base} = température de base ou seuil thermique auquel le développement de la plante est possible ($T_{\text{base}} = 11$ chez le mil).

- **Mesures des paramètres liés à la culture et au sol**

Les mesures et observations faites sur les paramètres physiologiques de la plante ont été de deux types : celles destructives (surface foliaire, matière sèche accumulée) et celles non destructives (hauteur, tallage, phénologie).

- ***Phénologie***

Les observations phénologiques ont été faites dans les parcelles utiles réservées aux mesures non destructives. Dans chaque parcelle, trois (3) poquets de deux (2) plants chacun ont été suivis par des observations régulières une fois par semaine. Chaque observation couvre toutes les répétitions d'un essai donné le même jour ou, en cas de contrainte (avènement de pluie), le jour et le lendemain. Les phases suivantes ont fait l'objet d'observation : la levée, le tallage, la montaison, l'épiaison, la floraison et la maturité (laiteuse, cireuse et complète).

- ***Hauteur des plants***

Le suivi de la hauteur a été réalisé par des mesures de la taille des brins maîtres de cinq poquets consécutifs (10 plants) à l'intérieur de chaque parcelle élémentaire. Les mesures ont été réalisées pendant le tallage, la montaison, l'épiaison-floraison et la maturité complète, dans tous les trois essais, lors des prélèvements destructifs pour le suivi de la biomasse sèche.

- ***Apparition et mortalité des feuilles***

Un suivi régulier (2 passages/semaine) de l'apparition et de la mort des feuilles a été effectué dans l'essai date de semis. A chaque passage, les nouvelles feuilles sont numérotées à l'aide d'un feutre indélébile de la plus ancienne à la plus jeune. Une feuille est considérée au terme de sa croissance lorsque sa ligule apparaît. Le numéro de la dernière feuille ligulée (LIG) est noté en même temps que la date d'apparition de la ligule. Celui de la dernière feuille vivante (VIV) est aussi noté. Une feuille est considérée vivante quand plus de la moitié de sa surface reste encore verte (non nécrosée). Une feuille abîmée (attaque d'insectes, cassure du limbe, etc.) n'est pas notée comme nécrosée. Les observations ont continué jusqu'à l'épiaison pour l'apparition des feuilles, mais pour la mort des feuilles, elles ont continué jusqu'à la récolte.

- *Suivi de l'accumulation de biomasse*

Le suivi de l'accumulation de biomasse aérienne a été effectué par des prélèvements destructifs des plants tous les 15 jours environ, dans les parcelles élémentaires réservées à cet effet, dans tous les trois essais. Il y a eu au total quatre prélèvements (au tallage, à la montaison, à l'épiaison-floraison et à la maturité complète) par campagne expérimentale (2002 et 2003) et par essai. Les mesures ont consisté à chaque fois :

- ✓ au prélèvement de 5 poquets consécutifs d'une même ligne de la parcelle utile;
- ✓ à la séparation des limbes des feuilles, des tiges et éventuellement des épis ;
- ✓ au séchage, des échantillons au soleil puis à l'étuve (70 °C) pendant 72 h ;
- ✓ à la détermination des poids sec des feuilles, tiges et épis.

- *Surface foliaire*

Le suivi de la surface foliaire a été fait dans les 3 essais. Il a combiné des mesures directes au planimètre optique (Delta-T MK2 : type AMS) et une estimation à partir des relations proposées dans la littérature (Amadou, 1994). Ces relations permettent d'estimer la surface d'une feuille à partir de ses dimensions linéaires ou de son poids sec. Les poids secs des feuilles ont été obtenus à partir des 5 poquets détruits à chaque fois pour le suivi de la matière sèche. A cette même occasion, un poquet a été pris au hasard pour mesurer les longueurs et largeurs maximales de toutes les feuilles vertes. Afin d'établir la droite de régression entre les mesures au planimètre et celles des dimensions linéaires, des feuilles ont été prélevées au hasard sur plusieurs plants, au tallage et à la montaison. Les relations obtenues sont linéaires et positives pour chaque variété (figures 11, 12 et 13) et leurs coefficients de régression ne dépendent que de la forme de la feuille qui est une propriété variétale (Amadou, 1994).

$$\text{Surface foliaire (mesurée au planimètre)} = a \times \text{surface foliaire brute (Lxlmax)} + b$$

Avec : a = pente de la droite et b = ordonnée à l'origine.

Cette relation a ensuite été utilisée pour estimer la surface foliaire de tous les échantillons de feuilles des 2 campagnes d'essai (2002 et 2003), dont les poids secs ont été déterminés en fonction des traitements appliqués dans les 3 essais. Pour cela, une autre relation, celle reliant la surface des feuilles et leurs poids secs respectifs, a été utilisée (Begué, 1991) :

$$\text{Surface foliaire} = a \times \text{poids sec des feuilles} + b$$

Avec : a = pente de la droite et b = ordonnée à l'origine.

A partir des corrélations obtenues pour les 3 variétés (figures 14, 15 et 16), la surface foliaire a été estimée à tous les stades de développement auxquels les prélèvements ont été réalisés. La surface foliaire est ensuite traduite en indice de surface foliaire (LAI) ou nombre de m² de surface foliaire par m² de surface du sol occupé par les plants de chaque traitement.

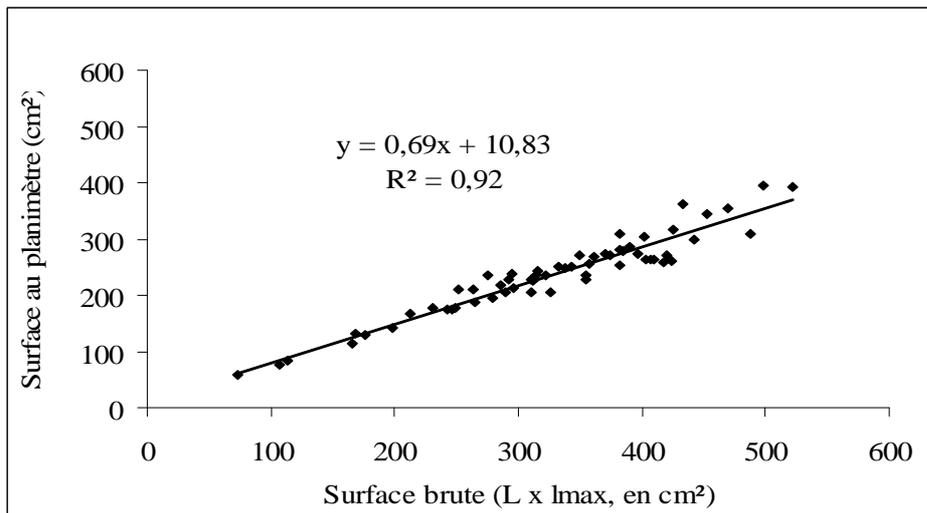


Figure 11 : Relation entre surface foliaire réelle (planimètre) et brute (L x lmax) de la variété de mil HKP. Agrhymet, 2002 et 2003.

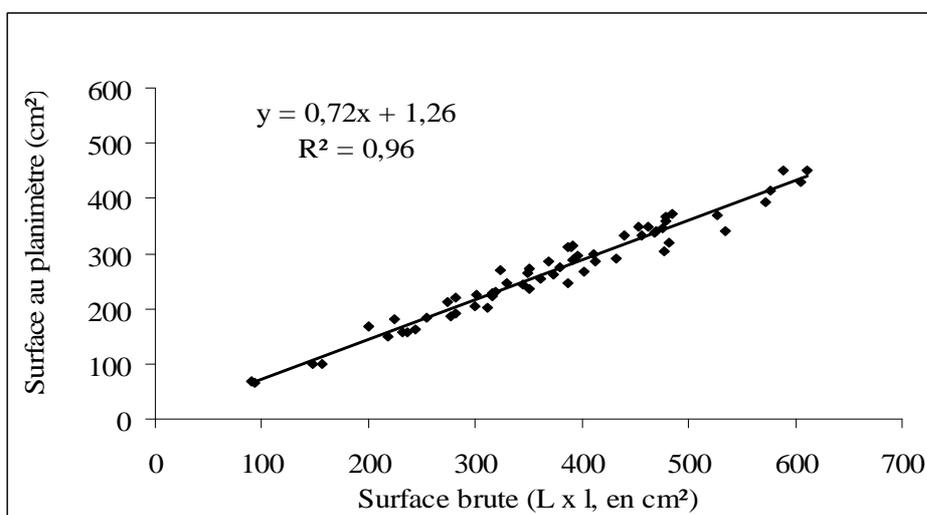


Figure 12 : Relation entre surface foliaire réelle (planimètre) et brute (L x lmax) de la variété ZATIB. Agrhymet, 2002 et 2003.

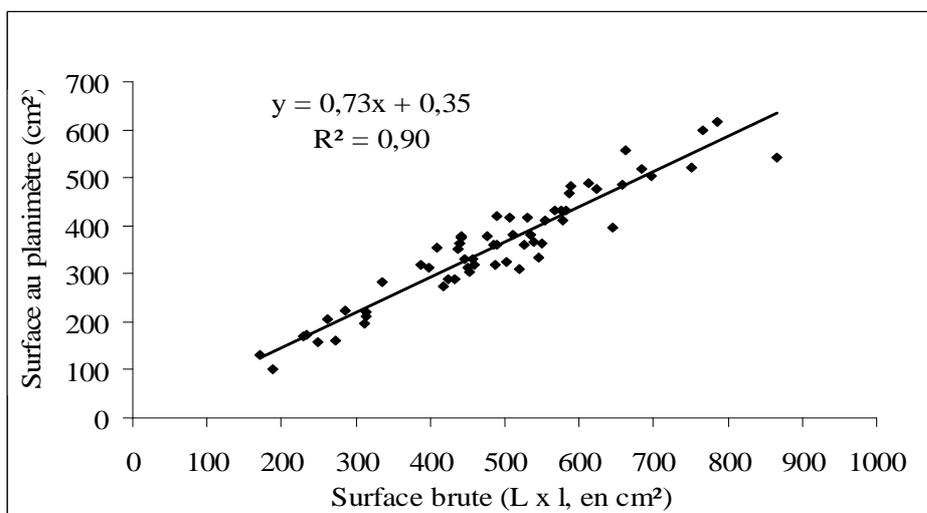


Figure 13 : Relation entre surface foliaire réelle (planimètre) et brute (L x lmax) de la variété de mil MTDO. Agrhymet, 2002 et 2003.

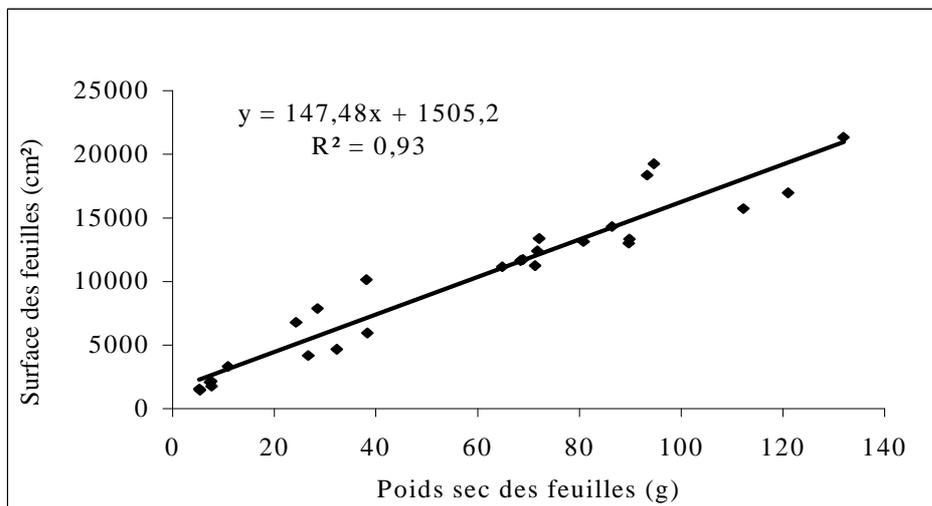


Figure 14 : Relation entre surface foliaire et poids sec des feuilles vertes de la variété de mil HKP. Agrhymet, 2002 et 2003.

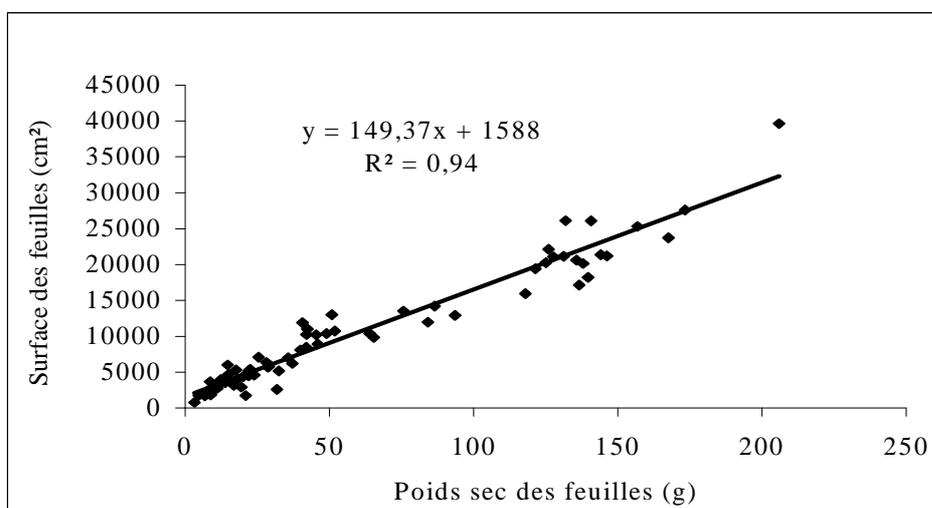


Figure 15 : Relation entre surface foliaire et poids sec des feuilles vertes de la variété de mil ZATIB. Agrhymet, 2002 et 2003.

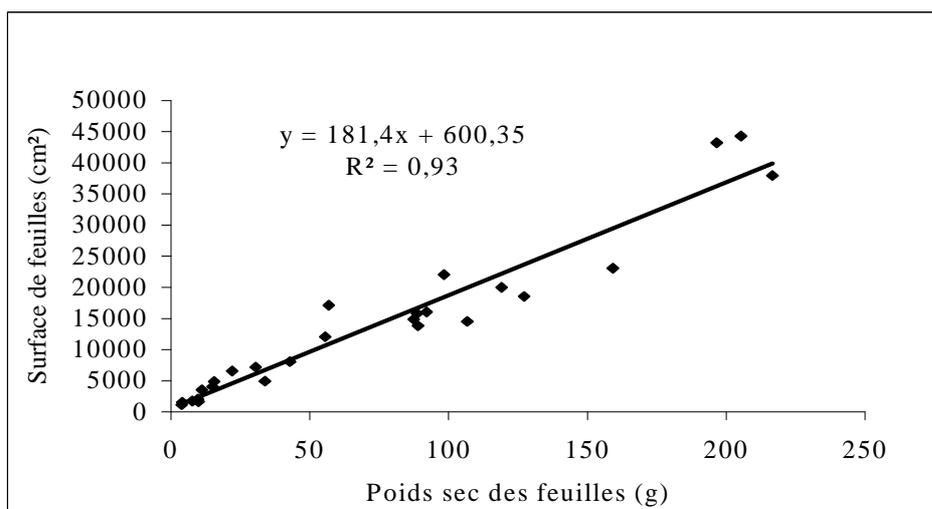


Figure 16 : Relation entre surface foliaire et poids sec des feuilles vertes de la variété de mil MTDO. Agrhymet, 2002 et 2003.

- *Suivi de l'humidité du sol*

Le suivi de l'humidité du sol a été réalisé en 2002 par la méthode gravimétrique en prélevant des échantillons de sol dans les parcelles élémentaires à l'aide d'une tarière. Cependant, en 2003 il a été effectué à la sonde à neutrons (Didcot Instrument, modèle IH II). En effet, il était prévu d'utiliser la sonde à neutrons pour le suivi de l'humidité du sol pendant toutes les deux campagnes d'essai, mais en 2002, il a fallu recourir à la tarière, en attendant la réparation de la sonde à neutrons. Le suivi de l'humidité du sol ainsi effectué a concerné seulement les deux composantes pluviale et irriguée de l'essai apport d'urée x densité de semis.

En 2002, les mesures ont été effectuées (tarière) environ tous les 15 jours. Les prélèvements ont été faits à 5, 10 et 20 cm de profondeur dans la frange superficielle du sol, puis tous les 20 cm au delà de cette frange jusqu'à 2 m. Les échantillons ont été prélevés dans des boîtes métalliques à tare qui étaient immédiatement fermées pour éviter la perte d'humidité. Ensuite, ils ont été pesés pour la détermination de leurs poids humides (P_{hum}) respectifs avant d'être séchés à l'étuve (105 °C) pendant 24 h en vue d'obtenir leurs poids secs (P_{sec}).

Pour chaque profondeur, l'humidité pondérale du sol (H_p , en %) est calculée comme suit :

$$H_p = (P_{\text{hum}} - P_{\text{sec}}) \times 100 / P_{\text{sec}}$$

On obtient l'humidité volumique (H_v , en %) en multipliant l'humidité pondérale par la densité apparente du sol.

$$H_v = H_p \times d_a \text{ (avec } d_a = \text{densité apparente (g cm}^{-3}\text{))}.$$

Le stock d'eau dans le sol est alors obtenu en multipliant l'humidité volumique par l'épaisseur (h , en cm) de la tranche de sol considérée (Hillel, 1974). On divise ensuite par 10 pour avoir le stock en mm.

$$\text{Stock} = H_v \times (h)/10$$

En 2003, les mesures de la teneur en eau du sol ont été effectuées (sonde à neutrons) une fois par semaine à tous les 20 cm de profondeur dans la tranche de sol comprise entre 30 cm et 240 cm. Dans la partie superficielle du sol (entre 0 et 30 cm), les mesures d'humidité ont été réalisées à la tarière aux profondeurs 5, 10 et 20 cm. Le principe de la mesure à la sonde est basé sur le fait que la propagation d'un neutron est freinée par la présence dans le milieu de noyaux d'hydrogène (Diouf, 2000). Les neutrons ralentis sont détectés en retour par un compteur. Plus le comptage est élevé, plus des neutrons ont été ralentis et plus le sol contient des molécules d'eau. Les données issues de ce comptage neutronique sont d'abord corrigées de la manière suivante : **Comptages neutroniques corrigé (CN_{corr}) = [(CN brutes / CN au point de référence dans l'eau) x 600]**. Les valeurs obtenues sont ensuite utilisées pour calculer l'humidité volumique (H_v).

La réponse de la sonde étant influencée par la composition chimique du sol, l'étalonnage a été fait pour chaque parcelle élémentaire par la méthode de la régression linéaire, selon la formule suivante :

$$H_v (\%) = a \times CN_{\text{corr}} + b$$

Avec : **a** et **b** = constantes liées au sol et CN_{corr} = comptage neutronique corrigé du point eau.

Le but de cet étalonnage est de calculer les coefficients a et b en comparant les comptages neutroniques corrigés aux valeurs d'humidité mesurées par la méthode gravimétrique. Le comptage neutronique corrigé permet d'éliminer les erreurs dues aux dérives du système et de faciliter le changement d'instruments.

Les humidités volumiques étaient obtenues à partir des humidités pondérales (H_p) parallèlement mesurées par gravimétrie jusqu'à deux mètres de profondeur en sol sec (avant la première pluie) et en sol humide (le lendemain d'une pluie) en utilisant la densité apparente (d_a) du sol.

- *Détermination de la densité apparente du sol*

Pour obtenir la densité apparente du sol, nous avons procédé à une série de prélèvements d'échantillons de sol, à différentes profondeurs, à l'aide d'un tube PVC de 4 cm de diamètre et 10 cm de hauteur. Le principe consiste à prélever des échantillons de sol correspondant au volume strict du tube qui est rempli par enfoncement vertical dans le sol. La manipulation est faite avec soin, de sorte à garder intacte la structure naturelle de l'échantillon de sol pendant le prélèvement. Cette opération, consistant à distinguer soigneusement (à partir d'un volume total d'un échantillon de sol) les volumes des particules solides et des porosités occupées par de l'air et de l'eau, nous a permis d'obtenir des valeurs de densités apparentes calculées selon la formule :

$$d_a = \text{Poids sec de l'échantillon} / \text{volume tube}$$

Les mesures d'humidité volumique à la tarière et/ou à la sonde à neutrons ont permis de déterminer à chaque observation les variations du stock d'eau dans des tranches de sol de profondeur variant de 5 cm à 240 cm.

- *Détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR)*

A partir des variations du stock d'eau (ΔS) entre dates d'observations et de la somme des apports en eau par les pluies (P) et les irrigations (I), l'évapotranspiration réelle (ETR) ou consommation en eau a été calculée selon les relations simplifiées du bilan hydrique :

$$ETR = P + I \pm R - D + RC - \Delta S$$

Avec : R = ruissellement, D = drainage, RC = remontée capillaire et $\Delta S = Stock_t - stock_{t-1}$

La relation ci-dessus du calcul de l'ETR prend en compte le ruissellement, le drainage et la remontée capillaire. Cependant, dans le contexte de notre expérimentation où les sols sont sableux et généralement insuffisamment humectés, ces paramètres ont été considérés comme négligeables.

- *Suivi de l'évaporation du sol*

L'évaporation du sol a été mesurée sous le couvert du mil à l'aide des microlysimètres installés entre les poquets de mil à raison d'un par parcelle élémentaire. Les microlysimètres ont été confectionnés à partir de tubes PVC de diamètres différents (7,5 et 6,3 cm) qui ont été découpés en morceaux de 26 cm, pour le plus grand et 16 cm, pour le plus petit (figure 17). Le plus petit a été rempli de sable en l'enfonçant dans le sol, au centre de la parcelle élémentaire, de façon à ne pas perturber la structure initiale du sol. Afin d'éviter des pertes de grains de sable pendant le drainage et lors des observations, un tamis en nylon à très petites mailles a été appliqué sur la base inférieure du tube. Le tube a été ensuite placé au-dessus d'une boîte métallique vide (10 cm de hauteur) servant à récupérer les eaux de drainage. L'ensemble avait ainsi une hauteur totale de 26 cm qui équivaut à celle du grand tube PVC (figure 17a). La surface du sol à l'intérieur du microlysimètre était maintenue au même niveau que celle du sol de la parcelle. Cependant, le bord supérieur du tube de protection était plus émergé pour empêcher les eaux de ruissellement et le sable externe de pénétrer dans le microlysimètre (figure 17b). Les microlysimètres et l'eau de drainage récupérée étaient pesés chaque jour, tôt le matin quand l'évaporation du sol est supposée négligeable, à l'aide d'une balance électronique à pile de capacité 1 kg et de précision 1 g. Après la pesée, l'évaporation sol du jour précédant est calculée pour chaque parcelle élémentaire comme suit :

$$\text{Evaporation jour}_{j-1} = \text{Poids du lysimètre jour}_j - \text{Poids du lysimètre jour}_{j-1} - \text{drainage jour}_{j-1}$$

Avec : *drainage jour_{j-1}* étant le poids de l'eau de drainage mesuré dans la matinée du jour_j

Les mesures ont été réalisées à partir du tallage jusqu'à la récolte. Dans l'analyse des résultats, nous avons retenu les valeurs obtenues pendant les jours ensoleillés pour comparer les différents traitements, dans la mesure où l'évaporation du sol est généralement négligeable pendant les jours de pluies ou de forte couverture nuageuse.

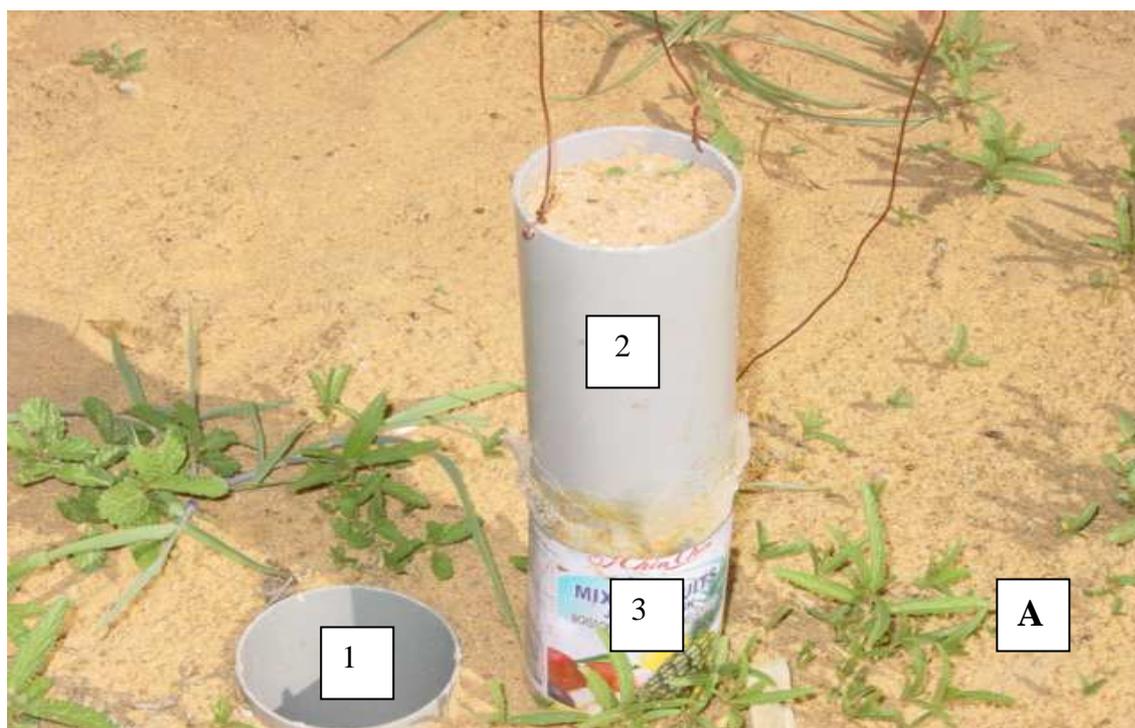


Figure 17 : Le microlysimètre et ses composantes :

- a** : 1= tube de protection placé dans le sol,
 2= tube du microlysimètre rempli de sol,
 3= boîte de récupération de l'eau de drainage.
- b** : microlysimètre entier placé dans le sol.

- *Mesures à la récolte*

A la récolte, les composantes du rendement ont été déterminées au niveau de chaque parcelle élémentaire non destructive:

- pour le rendement en épis et en grains, les mesures ont consisté d'abord au comptage du nombre de poquets, d'épis récoltés dans chaque parcelle utile et à la pesée de ces derniers à l'aide d'une balance commerciale d'une capacité maximale de 20 kg et de précision 50 g. Les épis ont ensuite été battus et les grains séparés pour la détermination de leurs poids. Des échantillons de grains ont été prélevés pour la détermination du poids de mille (1000) grains en vue de l'évaluation du taux de remplissage des grains issus des différents traitements. Ces dernières pesées ont été faites à l'aide d'une balance de marque METTLER PE 2000 d'une capacité maximale de 2 kg et dont la précision est de 0,5 g ;
- pour le rendement en paille, après la récolte des épis, les tiges (munies de leurs feuilles) de chaque parcelle utile ont été coupées au ras du sol à l'aide d'un coupe-coupe, séchées pendant deux semaines au soleil et pesées avec la balance commerciale.

La surface utile retenue pour la détermination de ces composantes du rendement était la même pour tous les traitements d'un même essai. Seul le nombre de poquets de mil à l'intérieur de la parcelle utile variait en fonction de la densité de semis.

- *Calcul de l'efficacité d'utilisation d'eau*

L'efficacité d'utilisation d'eau ($\text{kg mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$) a été déterminée à partir du rapport entre le rendement grains (kg ha^{-1}) donné par chaque traitement et la consommation hydrique ou ETR (mm) évaluée sous l'effet du même traitement.

Toutefois, ce calcul a concerné seulement l'essai dans lequel des mesures ont été faites pour la détermination de la consommation hydrique ; c'est-à-dire, celui dans lequel la variété de mil ZATIB a été testée vis-à-vis de l'apport d'urée et de la densité de semis.

Chapitre 7 : Expérimentations à Bambey (Sénégal)

7.1. Conditions physiques du milieu d'étude

7.1.1. Climat

Bambey est une ville du Sénégal localisée entre Thiès et Diourbel et faisant partie de la zone des cultures pluviales de l'arachide et du mil (figure 18). Cette partie des terres agricoles du Sénégal présente deux zones agroclimatiques différentes : la zone sahélo-soudanienne vers le Nord et la zone soudanienne vers le Sud. Elle est caractérisée par l'existence d'une longue saison sèche (d'octobre à juillet) et d'une courte saison des pluies (de juillet à septembre). Selon Diouf (2000), cette zone était encadrée par les isohyètes 400 et 800 mm jusqu'en 1968. Cependant, de 1968 à 1990, ces valeurs étaient passées à 300 et 600 mm, soit une descente moyenne de 10 mm an⁻¹ du nord au sud (figures 18 et 19). Pendant la saison sèche, la demande évaporative devient plus importante sous des conditions de température et de rayonnement global élevés. La température moyenne, généralement de 28 à 30 °C, manifeste des amplitudes journalières plus marquées en contre-saison (± 20 °C).

7.1.2. Sol

Selon Diouf (2000), 80 % des sols cultivés du Sénégal sont des sols ferrugineux tropicaux très sableux communément appelés sols dior et présentant un profil très homogène de la surface jusqu'à plus de 4 m de profondeur. Ces sols ont une porosité globale de 30 à 40 % (faible), et présentent une fraction argileuse également faible de 2 à 3 % (Pieri, 1976). Ils présentent des horizons très peu différenciés vers la surface et contiennent seulement 0,2 à 0,5 % de matière organique. Constitués de 91 à 94 % de sables, ces sols présentent une capacité de rétention en eau d'environ 75 à 80 mm d'eau utile sur 1 m de profondeur (Dancette, 1978) et une capacité d'échanges cationiques de 1,7 à 2,2 meq 100 g⁻¹ estimée très faible par Diouf (2000). Cependant, Agossou (2004) a situé la capacité au champ des sols dit Dior-Deck de la station de Bambey entre 80 à 100 mm sur l'horizon 1 m.

C'est dans ces conditions pédoclimatiques succinctement décrites qu'a été menée notre expérimentation en contre-saison (de mars à juin 2004), en vue d'étudier l'impact du régime hydrique sur le développement et la croissance de la variété ZATIB du mil, en fonction de la densité de semis en conditions de fertilisation azotée non limitante.

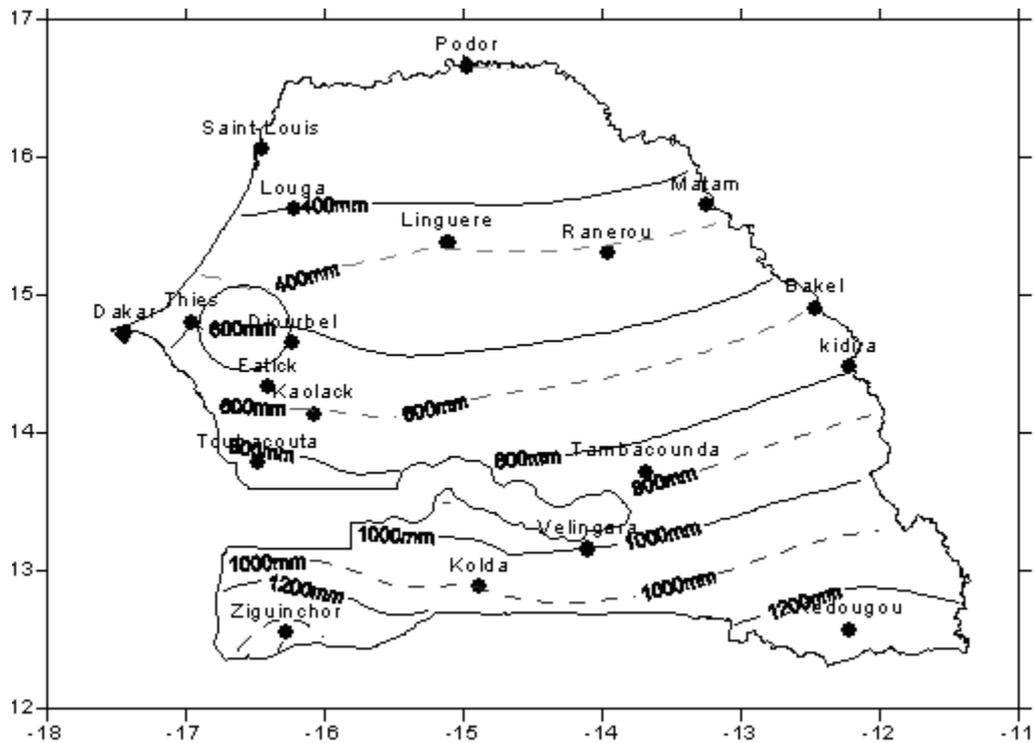


Figure 18 : Cumuls pluviométriques moyens annuels (1951-1990), en ligne continue et cumuls pluviométriques au cours d'une normale sèche (1961-1990). Le cercle indique la zone de Bambeï (adapté de Diouf, 2000).

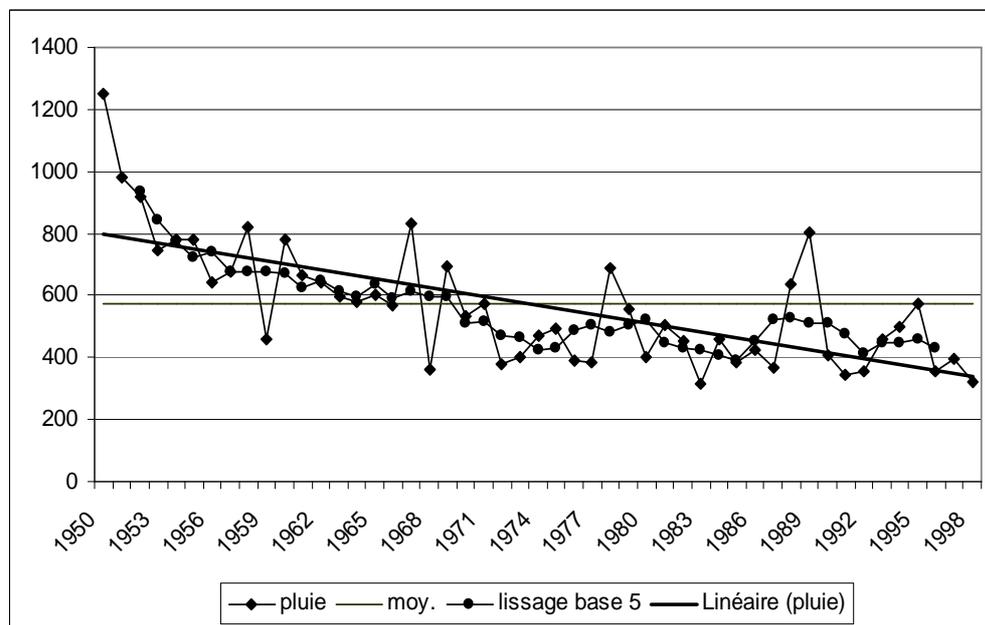


Figure 19 : Evolution inter annuelle de la pluviométrie, de 1950 à 1998 à la station de Bambeï (Diouf, 2000).

7.2. Matériel végétal

La variété semi-précoce ZATIB (95-100 jours), développée au Niger par l'INRAN du Niger, a été retenue dans le cadre de cet essai. Elle a été ainsi choisie non seulement à cause de son cycle semi-tardif adapté aux zones de cultures assez bien arrosées du Sahel (zones agroclimatiques intermédiaires entre la zone sahélienne et la zone soudanienne), mais aussi pour collecter des données dans des conditions climatiques différentes de celles du CRA pour les mêmes traitements de densité de semis, soumis cette fois-ci à des conditions hydriques contrôlées.

7.3. Méthodes

7.3.1. Mise en place et conduite de l'essai

L'essai a été conduit en contre-saison dans le domaine expérimental de la station de recherche du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Bambey, Sénégal. Il a été implanté sur un sol dior bien fertilisé en azote. Le semis a été fait le 24 mars 2004 après un labour du sol. Le dispositif expérimental était un Split-Plot à quatre répétitions avec deux facteurs étudiés : la densité de semis et le régime hydrique. La densité de semis était en petites parcelles (2 densités : 1 m x 0,80 m et 1 m x 1,20 m) et le régime hydrique en sous-blocs (3 régimes : ETM durant tout le cycle, stress hydrique provoqués pendant la phase végétative (S1), et pendant l'épiaison (S2)). Les unités expérimentales étaient constituées par 24 parcelles élémentaires de 12 m x 8 m, espacées entre elles par des allées de 1,5 m de large. Les densités de semis correspondantes aux écartements précités sont les suivantes : D1 = 1,20 m x 1 m, soit 16666 plants ha⁻¹ pour la faible et à D2 = 0,8 m x 1 m, soit 31250 plants ha⁻¹ pour la forte. Tous les traitements ont été mis dans les mêmes conditions de fertilité du sol en recevant des apports localisés aux poquets d'engrais respectivement sous forme :

- de NPK (15-10-10) à la dose de 100 kg ha⁻¹ au semis, soit 6,6 g poquet⁻¹ pour la forte densité de semis et 9,6 g poquet⁻¹ pour la faible densité ;
- d'urée apportée en deux tranches de 4,8 g poquet⁻¹, au tallage et à la montaison, de manière uniforme pour tous les deux traitements de densité de semis. Ainsi, les parcelles de la forte densité de semis ont reçu plus d'azote que celles de la faible densité. En effet, la fraction de 4,8 g d'urée, ainsi apportée au poquet en 2 tranches, donne par sommation : la dose de 50 kg ha⁻¹ par tranches (soit un total de 100 kg ha⁻¹ pour les 2 tranches) pour la faible densité de semis et la dose 70 kg ha⁻¹ (soit un total de 140 kg ha⁻¹) pour la forte densité de semis. Ceci a permis de tenir compte de la demande en nutriments azotés qui est naturellement plus élevée dans les parcelles à forte densité de semis.

Le démariage a été fait à deux plants par poquets au 15^e JAS. Deux sarclages ont été faits : au 14^e JAS et au 33^e JAS. Le premier traitement de stress hydrique (S1) a été appliqué aux parcelles réservées à cet effet du 39^e au 53^e JAS, soit une période de déficit hydrique de 14 jours. Le second stress (S2) avait duré également 14 jours ; il a été appliqué 3 jours après la fin du premier. L'application du déficit hydrique se fait par suspension des irrigations jusqu'à obtenir un flétrissement des plants qui s'observe même au lever du soleil. Quant aux parcelles réservées au régime hydrique ETM, elles ont été régulièrement irriguées jusqu'à la maturité complète des épis. Les rendements finaux ont été déterminés à la récolte sur des rectangles utiles de 5 m x 4 m délimités au centre des parcelles élémentaires.

7.3.2. Observations et mesures

Toutes les observations et mesures effectuées au CRA sur la même variété ont été répétées à Bambey (suivi des paramètres liés au climat, au sol et à la plante). En plus, d'autres indicateurs y ont été également suivis avec des outils ou appareils non disponibles au CRA.

- ***Mesures des paramètres climatiques***

Les données climatiques ont été recueillies à partir d'une station météorologique située à proximité de l'essai (à environ 200 m). Ces données journalières, ayant concerné les températures (maxima et minima), la vitesse du vent, l'humidité relative ambiante (maximale et minimale), la pluviométrie, la durée d'insolation, ont permis le calcul des évapotranspirations potentielles (ET_o) journalières par la méthode de FAO Penman-Monteith, comme au CRA. Des cumuls de températures journalières ont également été calculés pour exprimer les différents cycles de développement de la culture en terme de degrés jour.

- ***Mesures des paramètres liés au sol et à la plante***

- ***La surface foliaire et le LAI*** : L'indice de surface foliaire (LAI) a été mesuré pour évaluer le développement du couvert végétal de la culture à l'échelle de la parcelle élémentaire par deux méthodes.

La première méthode était celle utilisée au CRA et qui était basée sur la combinaison de mesures directes au planimètre optique (Delta-T MK2, type AMS) et une estimation à partir d'une relation entre la surface de la feuille et son poids sec (Amadou, 1994).

La deuxième méthode a consisté en des mesures directes de l'indice de couverture du sol, à l'aide du LAI-mètre LAI-2000 (plant canopy analyser Li-cor). Le LAI-2000 est un instrument qui permet des mesures rapides, faciles et non destructives des feuilles. Il permet la collecte et l'enregistrement des données directement sur le terrain, pour toutes les cultures aussi bien basses que hautes. Il est utilisable aussi bien pour les grandes couvertures végétales (forêt) que pour les petits feuillages isolés de plants individuels. Pouvant être utilisé dans diverses

situations atmosphériques, incluant toutefois d'assez bonnes conditions d'ensoleillement, le LAI-2000 permet le calcul des angles d'inclinaison des feuilles et d'autres paramètres relevant de ses capacités. Les mesures se font au-dessus et en dessous du feuillage pour mieux déterminer la quantité de lumière interceptée par le feuillage dans cinq angles à partir desquels le LAI est évalué sur la base d'un modèle de transfert radiatif dans le couvert végétatif.

- **Echanges gazeux foliaires : Conductance stomatique et transpiration** : La conductance stomatique et la transpiration ont été mesurées avec le même appareil, un poromètre à régime stationnaire du modèle LI-1600 (LI-COR Inc., Lincoln). L'appareil enregistre également le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). Les mesures ont porté à chaque fois sur la troisième feuille, à partir du haut, de trois pieds différents par parcelle.

- **Température du couvert et déficit de pression de vapeur d'eau de l'air** : La température du couvert a été mesurée par radiothermométrie infrarouge (Telatemp AG42, Fullerton) et le déficit de pression de vapeur à l'aide d'un psychromètre ventilé (Assman portable). Les mesures ont été réalisées 2 fois par semaine pendant les stress S1 et S2 (du 41^e au 69^e JAS), entre 11 h 30 min et 13 h 30 min. Le psychromètre était placé à environ 1,5 m du sol et déplacé dans les parcelles élémentaires en même temps que le radiothermomètre infrarouge. Le psychromètre était composé de deux thermomètres (humide et sec) dont les résultats des mesures servent à calculer l'humidité relative et le déficit de pression de vapeur.

Pour chaque parcelle élémentaire, la température du couvert (T_c) est mesurée en visant la partie centrale selon un angle de 30 à 40 °C à partir de chacun des coins de la parcelle, soit 4 mesures. Selon Diouf (2000), la température d'un couvert dépend en partie de sa transpiration et, pour un déficit de pression de vapeur donné de l'air, la différence de température (entre le couvert et l'air) dite $T_c - T_a$, varie entre 2 limites inférieure et supérieure. Ces limites correspondent aux valeurs minimales (transpiration maximale en conditions hydriques ETM) et maximales (transpiration insignifiante en situation de stress hydrique) de $T_c - T_a$. En cas de déficit hydrique, la chaleur n'est plus dissipée par transpiration, mais par convection et radiations thermiques.

- **L'humidité du sol** : Les mesures ont été effectuées à la sonde à neutrons comme au CRA (Campbell modèle 503, avec des tubes d'accès en aluminium), une fois par semaine tous les 10 cm dans la tranche de sol comprise entre 20 cm et 150 cm. Dans la partie superficielle du sol (entre 0 et 20 cm), les mesures ont été réalisées à la tarière aux profondeurs 10 et 20 cm. Afin d'évaluer le stock d'eau disponible au niveau du profil racinaire, une densité apparente du sol de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ a été utilisée sur l'ensemble du profil et l'évapotranspiration réelle (ETR) a été calculée par la même méthode qu'au CRA.

La fraction d'eau transpirable par la plante ou "fraction of transpirable soil water (FTSW)" a été calculée une fois par semaine durant le cycle de la variété :

$$\text{FTSW} = ((\text{Stock} - pF4.2)/(\text{RU} \times \text{profondeur racinaire})) \times \text{profondeur racinaire}$$

Avec : Stock = stock d'eau du sol dans la zone racinaire (mm), pF4.2 = point de flétrissement et RU = réserve utile (mm/msol). Ces variables sont fonction de la profondeur racinaire, donc de la croissance de la culture

- **Les composantes du rendement à la récolte** : A la récolte, les rendements finaux (en kg ha⁻¹) en épis, en grain, en paille ainsi que le poids de 1000 grains étaient déterminés sur le carré de rendement de chaque parcelle élémentaire, à l'aide d'une balance électronique, de la même manière qu'au CRA.

Chapitre 8 : Paramétrage du modèle SARRA-H

Le calibrage du modèle SARRA-H a été effectué sur sa version (V3.0.0.0). Au cours de l'opération, certaines valeurs paramétriques du modèle n'ont pas été modifiées. Par contre, d'autres ont été soit ajustées dans les limites des intervalles de variation définis pour le mil (manuel d'utilisation SARRA-H V2.3), soit calculées à partir des données expérimentales collectées en contre-saison 2004, sur la variété ZATIB du mil à Bambey, Sénégal (tableau IX). En effet, les valeurs calculées ont été définies selon deux densités de semis (D1 = 16 666 plants ha⁻¹ et D2 = 31 250 plants ha⁻¹) associées à des conditions d'approvisionnement en eau et de fertilité du sol non limitantes. Le sol de culture est caractérisé par une faible rétention d'eau et une capacité au champ de l'ordre de 80 à 100 mm sur l'horizon 1 m.

D'autres données, obtenues sur le même essai en situation de stress hydriques pendant la croissance végétative et la reproduction, ont servi à la validation du modèle. Cet exercice de validation a été élargi aux données expérimentales recueillies pendant les saisons pluvieuses 2002 et 2003, au CRA de Niamey au Niger. Ces données concernent la même variété ZATIB soumise aux effets de la date de semis, de la densité de semis et/ou de la fertilisation azotée.

Les rendements de cette variété ont été simulés, aussi bien pour l'essai de Bambey que pour ceux de Niamey et pour chaque localité il a été considéré un couple de valeurs : simulé et observé. La formule de passage a été déterminée en confrontant les rendements simulés et ceux réellement observés. Plusieurs paramètres, généralement traduits en coefficients pour prendre en compte les différents aspects du développement de la plante, ont été intégrés dans le modèle SARRA-H. Ces paramètres abordent notamment les aspects comme : l'interception de la lumière et production de matière sèche, les relations allométriques, les durées des stades phénologiques en temps thermique et les besoins maxima en eau.

8.1. Interception de la lumière et production de matière sèche

- Le coefficient d'extinction de la lumière (K) : il est lié à l'espèce et aux propriétés géométriques du couvert. Il varie de 0,3 à 0,6 selon la hauteur des plants et le port des feuilles dressées du mil (Craufurd et Bidinger, 1988 ; Monteith *et al.*, 1989).
- Le coefficient de conversion maximale de l'énergie lumineuse (PAR) interceptée (ϵ_b) : sa valeur moyenne varie de 3 à 4 g MJ⁻¹j⁻¹ pour les plantes en C4 comme le mil (Kiniry *et al.*, 1989). Cependant en fonction des stades de développement de la plante, il peut atteindre 6 g MJ⁻¹j⁻¹, dans les conditions optimales de nutrition hydrique et azotée. Dans le cas des céréales, la capacité de conversion de ϵ_b est réduite pendant la phase de maturation, en raison du phénomène de sénescence foliaire.
- La respiration de maintenance (Respmaint) : elle traduit les pertes de matière sèche en gramme de CO₂ par gramme de matière sèche par jour. Ces pertes ont été estimées par Penning de Vries *et al.* (1989) à 0.03 à 25 °C en moyenne pour le mil (feuilles). Toutefois, dans nos conditions expérimentales, la température moyenne a été de 28,64 °C à Bambey. Au CRA, elle a été de 29,5 °C en 2002 et de 29 °C en 2003.

8.2. Relations allométriques

Il existe une corrélation linéaire entre le quotient (biomasse feuille / biomasse aérienne) et la biomasse aérienne avant la floraison (figure 20). Cette relation n'est pas affectée par le stress hydrique et ne dépend que du stade de développement de la plante (Anonyme, 2002). Il est aussi souligné dans ce rapport que l'ordonnée à l'origine et la base de la relation ne varient pas pour le mil ($K_{\text{pentefeuille}} = -4 \times 10^{-4}$ et $K_{\text{basefeuille}} = 0,70$). Cependant, ces coefficients ont légèrement changé avec la variété ZATIB du mil qui a donné un $K_{\text{pentefeuille}} = -9 \times 10^{-5}$ et un $K_{\text{basefeuille}} = 0,67$, comme le montre le tableau IX, résumant les différents résultats du paramétrage du modèle pour cette variété de mil.

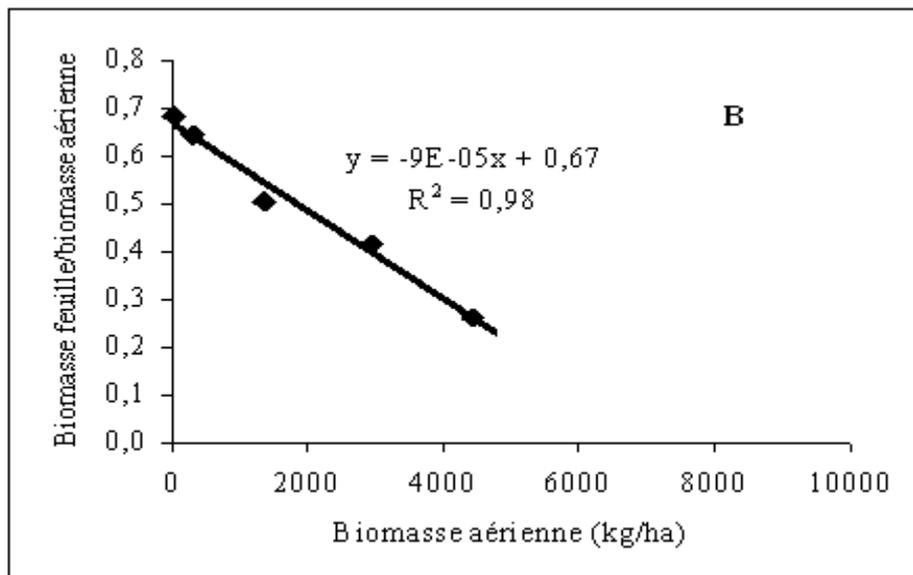
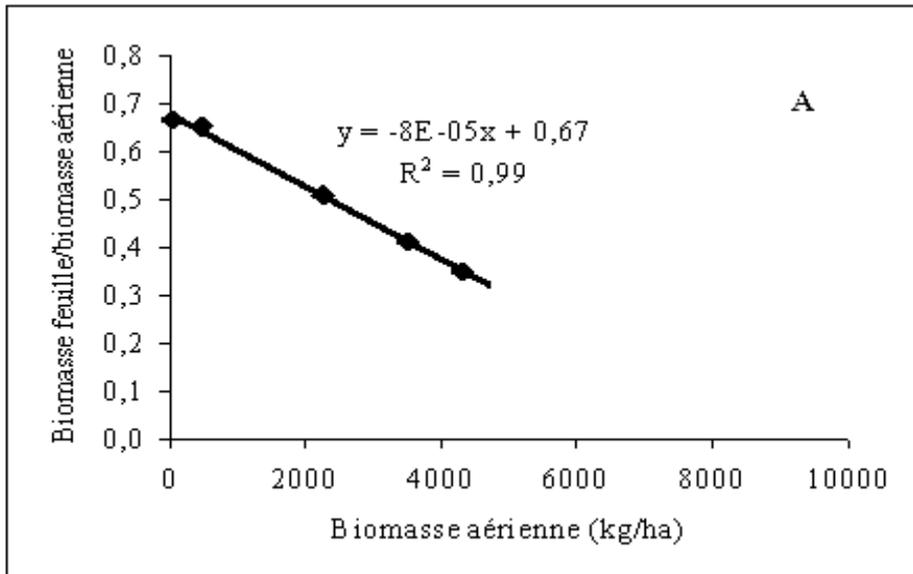


Figure 20 : Relation entre le quotient (biomasse foliaire/biomasse aérienne) et la biomasse aérienne de la variété ZATIB du mil pour 2 densités de semis : D1 = 16 666 plants ha⁻¹ (A) et D2 = 31 250 plants ha⁻¹ (B), en situations hydrique et de fertilité du sol non limitantes. Bambeby 2004.

8.3. Durées des stades phénologiques en temps thermique

Le seuil de température (T_{base}), à la limite duquel la germination et le développement de la plante sont possibles, a été fixé à 11 °C pour le mil (Ong et Monteith, 1984). Le modèle gère les températures optimales par paliers (avec $T_{opt1} = 30$ °C, $T_{opt2} = 36$ °C et température limite (T_{lim}) = 47 °C pour le mil) tout en prenant soin d'écarter les valeurs thermiques supérieures à T_{lim} , du fait qu'elles ne sont pas favorables au développement de la plante (Huda, 1987).

Le modèle assure la gestion des différentes phases phénologiques à travers des sommes thermiques (en degrés jours), pour lesquelles des seuils ont été définis selon les phases (levée, BVP, RPR, $MATU_1$ et $MATU_2$). Dès que le seuil défini pour une phase donnée est atteint, le modèle passe à la phase suivante. La durée de chacune de ces phases est considérée constante pour une variété donnée, excepté la phase PSP dont la durée est fonction de la photopériode. Pour la variété ZATIB du mil, les durées de ces phases ont été établies en temps thermique (degrés jours) comme présenté dans le tableau IX.

La durée de la phase PSP complète celle de la phase BVP qui devient alors variable en fonction de la date de semis et de la sensibilité de la variété au photopériodisme. Dans ce cas, SARRA-H prend en compte le phénomène du photopériodisme en considérant une photopériode critique de 11,5 h pour les plantes de jours courts.

8.4. Besoins maxima en eau

Le K_{cmax} (coefficient cultural maximal ou besoins maximaux en eau de la plante) a été défini dans SARRA-H comme étant de l'ordre de 1,25, en conditions d'alimentation hydrique non limitante, pour une couverture complète du sol (LAI de 4 environ), des évapotranspirations maximales de l'ordre de 7 mm j^{-1} et une E_{To} autour de 5,7 mm j^{-1} (Sarr *et al.*, 1999 ; Anonyme, 2002).

La réduction de la transpiration foliaire commence à partir d'une valeur de P_{factor} de 0,50 à 0,55 pour les mils (Sarr, 1997 ; Allen *et al.*, 1998 ; Sarr *et al.*, 1999).

Tableau IX : Paramètres utilisés dans le calibrage du modèle SARRA-H V3.0.0.0 pour la simulation des composantes du rendement de la variété de mil ZATIB. Bambey, 2004.
Avec : * = coefficient ajustés, ** = coefficient calculés, # = traitement de la faible densité de semis (D1) associé à un régime hydrique optimal (ETM = évapotranspiration maximale)

Paramètres de calibrage de SARRA-H	Sigles	Unités	Valeur de calibrage (pour ETM X D1 [#])
Sol			
Vitesse d'enracinement phase Levée*	SDJLevée	mm jour ⁻¹	20
Vitesse d'enracinement phase BVP*	SDJBVP	mm jour ⁻¹	20
Vitesse d'enracinement phase PSP*	SDJPSP	mm jour ⁻¹	20
Vitesse d'enracinement phase RPR*	SDJRPR	mm jour ⁻¹	20
Vitesse d'enracinement phase Matu1*	SDJMatu1	mm jour ⁻¹	0
Vitesse d'enracinement phase Matu2*	SDJMatu2	mm jour ⁻¹	0
Phénologie et photopériodisme			
Cumul thermique Levée**	SDJLevée	°C jour ⁻¹	77
Cumul thermique Levée-Initiation paniculaire (BVP)**	SDJBVP	°C jour ⁻¹	322
Cumul thermique Initiation paniculaire-Floraison (RPR)**	SDJRPR	°C jour ⁻¹	647
Cumul thermique Floraison-Maturité Cireuse (Matu1)**	SDJMatu1	°C jour ⁻¹	405
Cumul thermique Maturité cireuse-Maturité totale (Matu2)**	SDJMatu2	°C jour ⁻¹	112
Température de base	Tbase	°C	11
Température Optimale1	Topt1	°C	30
Température Optimale2	Topt2	°C	36
Température limite	Tlim	°C	47
Température de Référence de Respiration de Maintenance	TxrespMaint	°C	25
Seuil horaire ou la floraison est immédiate	Ppcrit	Heure	11,5
Type de courbe de réponse à la photopériode (linéaire, parabole)	PPforme		0
Coefficient sensibilité à la photopériode	Ppsens		1
Biomasse initiale et assimilation du carbone			
Densité de semis**	Densité	Plants ha ⁻¹	16666
Taux de réserve des graines transformé en biomasse	TxResgrain	%	0,5
Taux de réallocation	TxRéalloc	%	0,7
Poids moyen d'une graine**	PMG	G	0,0282
Coefficient d'extinction de la lumière	K		0,5
Coefficient de conversion de l'énergie lumineuse*	ε _l	G MJ ⁻¹ J ⁻¹	5
Coefficient d'efficacité d'assimilation des feuilles, Phase BVP	TxAssimBVP	%	1
Coefficient d'efficacité d'assimilation des feuilles, Phase Matu1	TxAssimMatu1	%	0,7
Coefficient d'efficacité d'assimilation des feuilles, Phase Matu2	TxAssimMatu2	%	0,3
Coefficient de l'espèce pour le calcul du taux de transpiration	Pfactor		0,55
Coefficient cultural maximum de l'espèce (Allen <i>et al.</i> , 1998)	Kcmax		1,25
Coefficient moyen d'angle des feuilles (couvert)	Kdf		0,51
Respiration de maintenance de la biomasse totale	RespMaint	Kg ha ⁻¹	0,01
Coefficient de réduction du poids de grains / à teneur en huile	Tx chimique	%	1
Partition de la biomasse aérienne			
Pente de la relation de répartition BiomFoliaire-BiomAérienne**	FeuilAéroPente		-9.10 ⁻⁵
Base de la relation de répartition BiomFoliaire-BiomAérienne**	FeuilAéroBase	%	0,67
Pente de la relation de répartition BiomAérienne-BiomTotale	Aéro TotPente		2.10 ⁻⁵
Base de la relation de répartition BiomAérienne-BiomTotale	Aéro TotBase	%	0,5
Surface foliaire			
Surface massique des feuilles minimum**	SLAmin	m ² kg ⁻¹	0,0015
Surface massique des feuilles maximum**	SLAmax	m ² kg ⁻¹	0,0049
Pente Surface massique des feuilles**	SLAPente		0,43
Rendement			
Coefficient d'évaluation du rendement potentiel	KRdtPotA		0,5

8.5. Variables d'entrée du modèle SARRA-H

Une fois le modèle calibré et validé, l'utilisateur n'emploie en entrée que des variables climatiques comme : la pluviométrie (mm j^{-1}) et la demande climatique journalière (mm j^{-1}) pour le bilan hydrique, la température minimale, moyenne et maximale (en $^{\circ}\text{C}$) du jour pour le calcul du temps thermique et la gestion de la phénologie, la durée de l'insolation (h) ou le rayonnement global (MJ j^{-1}) pour déterminer l'assimilation du carbone, la vitesse du vent à 2 m du sol (m s^{-1}), pour le calcul de l'ETo. Les variables agronomiques nécessaires à la simulation sont la date de semis (pour l'initialisation de la simulation), la variété type, la densité de peuplement (nombre de plants ha^{-1}), la latitude pour le calcul et la prise en compte de la photopériode, la réserve utile (RU) du sol (mm m^{-1}) pour le bilan hydrique.

La RU étant dépendante du type de sol, les valeurs retenues pour les sols tropicaux ferrugineux sableux (sols dior) de Bambey sont celles prédéfinies dans SARRA-H de 100 mm m^{-1} pour les sols sableux de surface et de 140 mm m^{-1} pour les sols argilo-sableux (sols dior-dek) de profondeur. Cependant, pour les champs expérimentaux du CRA de Niamey, la RU a été recalculée à partir des données gravimétriques fournies par Denis et *al.*, (1984) et par Gérard (1990), en utilisant le logiciel Soilhydr qui a été développé sur la base des travaux de Saxton et *al.*, (1986). Ainsi, pour les proportions de sable, limon et argile présentées dans le tableau X, le logiciel a estimé la RU à 72 mm m^{-1} dans la tranche 0-20 cm et à 79 mm m^{-1} dans la tranche 20-40 cm, pour le sol du CRA. Pour la tranche de sol 40-100 cm, nous avons considéré les mêmes caractéristiques que la tranche 20-20 cm.

Tableau X : Utilisation de la texture du sol du CRA pour le calcul de sa réserve utile (RU) en eau, à l'aide du logiciel SoilHydr (*adapté de Denis et al., (1984)*)

Prof. (cm)	Constitution granulométrique du sol (%)			Calculs effectués avec SoilHydr			
	Sable	Limon	Argile	Densité (g cm ⁻³)	pF3.0	pF4.2	RU (mm m ⁻¹)
0-20	91,7	5,0	3,4	1,77	11,9	4,7	72
20-40	87,0	7,4	5,6	1,68	14,0	6,1	79

Chapitre 9 : Exploitation des données

Les données des tous les essais ont été saisies sur le tableur Excel. Ce logiciel a été également utilisé pour le calcul des moyennes de certains résultats, notamment ceux du suivi de l'accumulation de la biomasse aérienne et de la phénologie. Il a servi aussi à la confection des graphiques, ainsi que le logiciel SigmaPlot. Certains résultats, notamment ceux des composantes du rendement, de l'humidité du sol et des échanges gazeux, ont été traités à l'aide du logiciel GENSTAT.6 pour l'analyse de la variance et la séparation des moyennes. Le modèle SARRA-H a été utilisé pour la simulation des rendements obtenus dans les différents essais et enfin, le logiciel Word pour le traitement de texte.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 10 : Expérimentations au CRA

10.1. Accumulation de biomasse aérienne

10.1.1. Effet de la date de semis

L'effet du décalage de la date de semis a été testé sur trois variétés de mil de cycles différents : HKP (90 jours), ZATIB (100 à 105 jours) et la MTDO (120 jours). Aussi bien en 2002 qu'en 2003, les trois premiers prélèvements de biomasse ont été faits tous les 15 jours environ, à partir du tallage. Par contre, celle faite à la récolte a été différée en fonction de la date de maturité des épis de chaque variété (annexe 1).

Les résultats obtenus montrent que la variété précoce HKP s'est comportée différemment en 2002 et 2003, selon la 1^{ère} et la 2^e date de semis. Ainsi, en 2002 les plants de la 2^e date de semis de cette variété ont développé plus de biomasse aérienne que ceux de la 1^{ère} date de semis (figure 21). Cependant, il est à noter que les plants du 1^{er} semis de cette variété précoce (HKP) n'ont pas été affectés par l'épisode sec survenu pendant la première décade de septembre 2002. Il en est de même pour la variété semi-tardive (ZATIB) dont le potentiel de production en biomasse aérienne est resté sensiblement le même, pour les deux dates de semis (figure 23). Quant à la variété tardive (MTDO), elle a eu une production en biomasse aérienne très réduite avec le retard de semis (figure 25). Il ressort des figures (21 à 26) que la biomasse foliaire connaît une chute (sénescence foliaire) plus précoce chez les plants de la 2^e date de semis que chez ceux de la première date.

Les résultats obtenus en 2003 montrent que les tiges, feuilles et épis des plants de toutes les variétés ont eu des poids secs plus élevés avec le 1^{er} semis qu'avec le second (figures 22, 24 et 26). Ceci montre qu'en 2003, le potentiel de production en biomasse aérienne de toutes les trois variétés a été réduit avec le retard de semis ; comme cela a été le cas en 2002 pour la variété tardive (MTDO). Aussi, les variétés ZATIB et MTDO ont été sensibles au décalage de la date de semis aussi bien en 2002 qu'en 2003 (figures 23 à 26), sauf qu'en 2002 le poids sec des grains de la variété MTDO a été le même pour les deux dates de semis (figure 25).

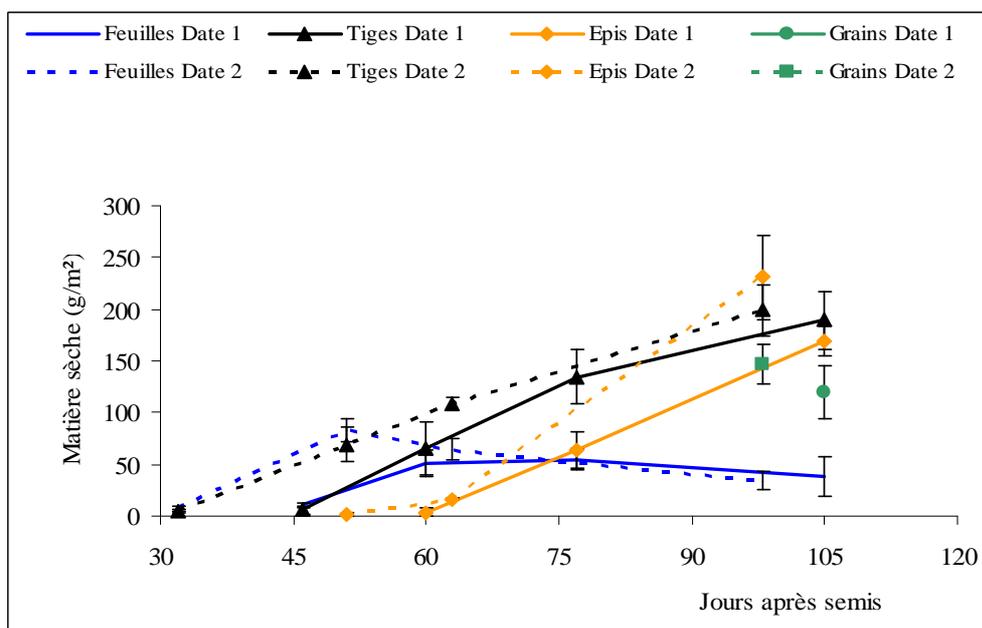


Figure 21 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil HKP en fonction de la date de semis (*Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet*). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

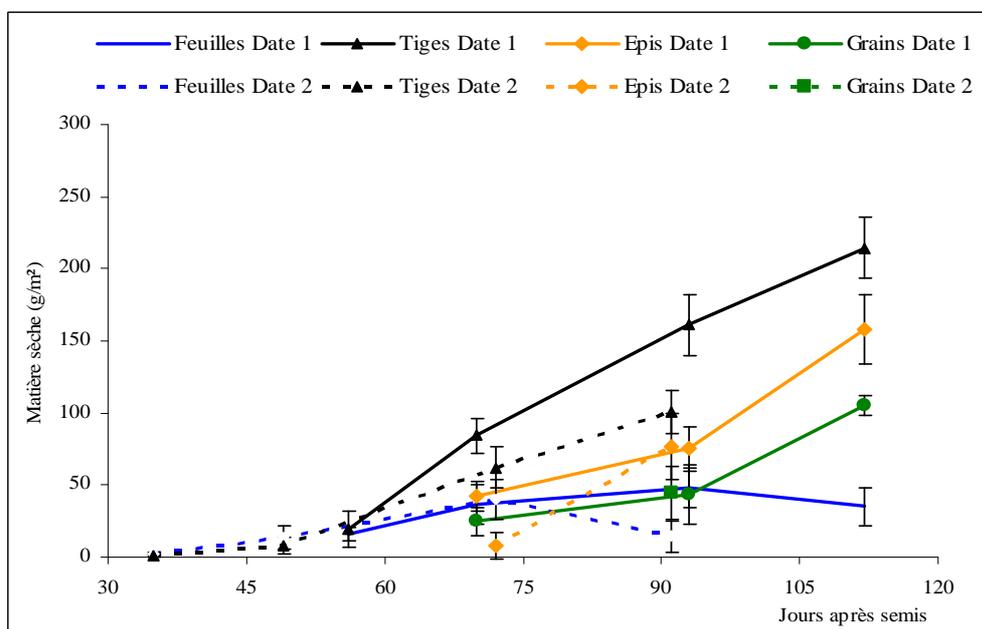


Figure 22 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil HKP en fonction de la date de semis (*Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet*). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

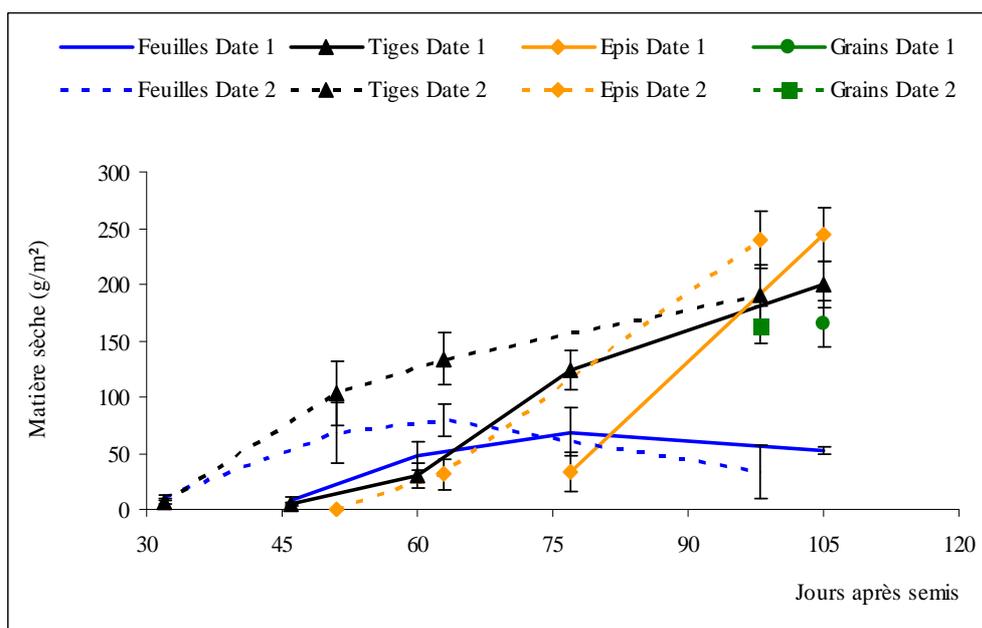


Figure 23 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil ZATIB en fonction de la date de semis (*Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet*). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

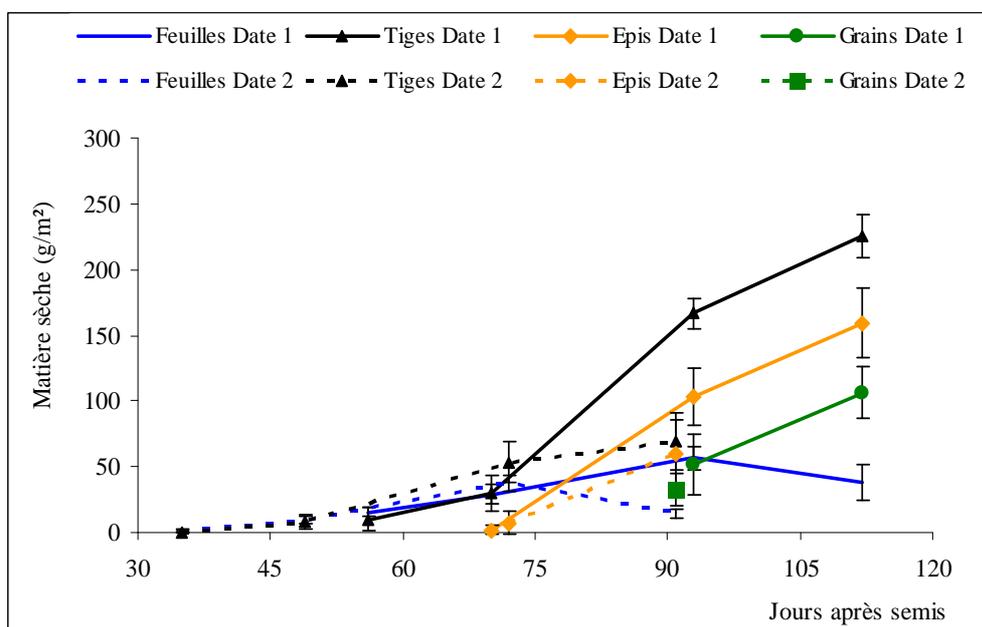


Figure 24 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil ZATIB en fonction de la date de semis (*Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet*). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

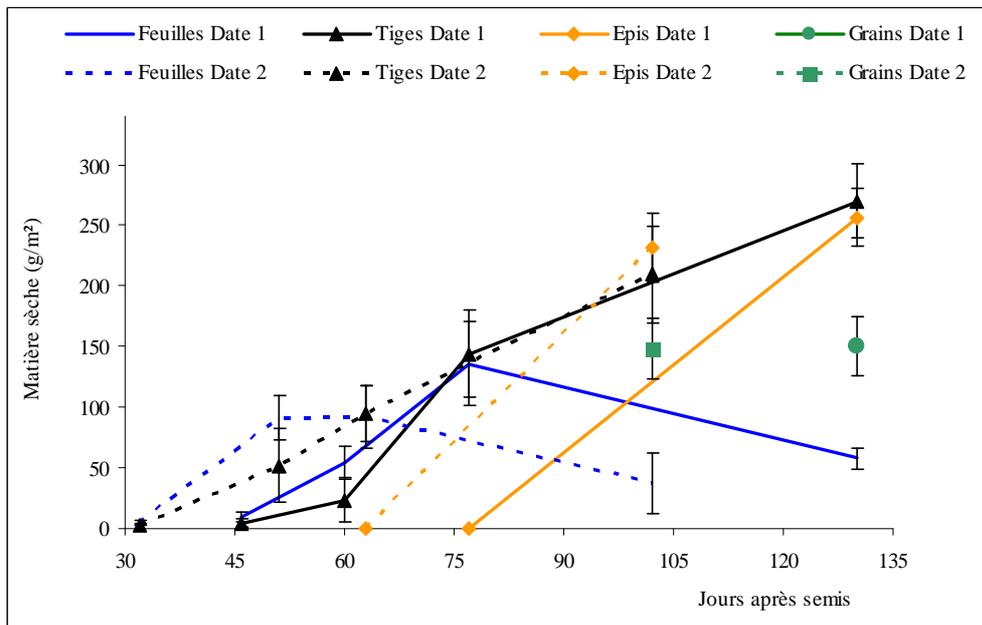


Figure 25 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet*). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

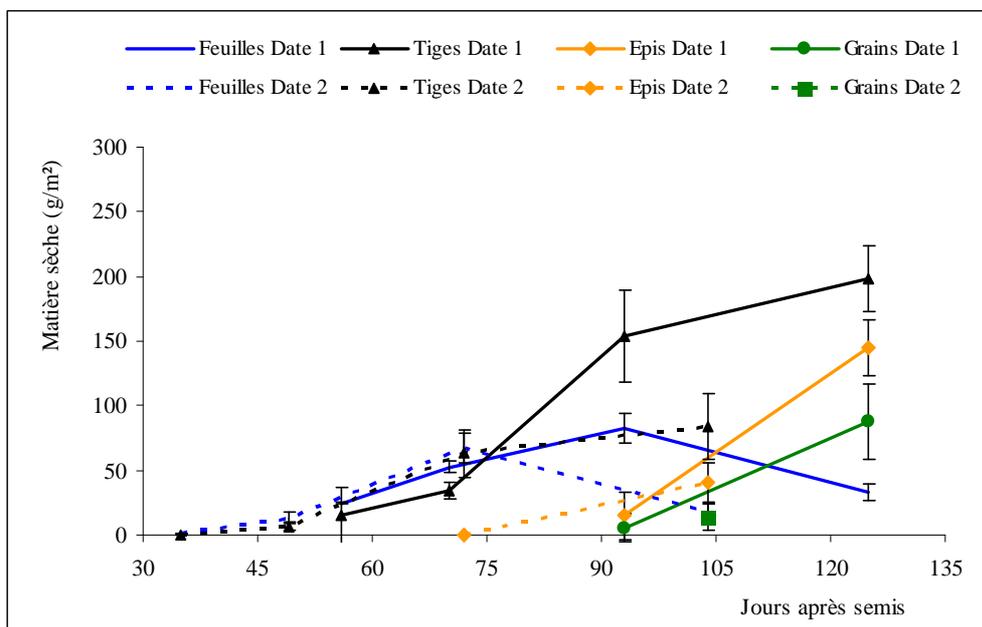


Figure 26 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété de mil MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet*). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

Il ressort de ces résultats qu'en 2002 la variété précoce (HKP) a eu un comportement particulier vis-à-vis de l'effet du décalage de semis. Ceci serait dû au fait qu'en 2002, les plants de la 1^{ère} date de semis de cette variété ont connu, juste après la levée, un épisode sec qui a affecté leur développement, contrairement à ceux du 2^e semis (fait après l'épisode sec). Les plants de la 2^e date de semis de cette variété (à cycle court) auraient donc bénéficié des conditions hydriques d'après levée meilleures pour développer plus de talles productives que ceux de la 1^{ère} date de semis. Ce comportement particulier de la HKP pourrait aussi s'expliquer, chez les céréales en général, par le nombre de talles qui meurent pendant la montaison en fonction de la fertilité du sol et plus particulièrement en fonction de la disponibilité en eau et des variations des températures dans le milieu de culture (McIntyre *et al.*, 1993 ; Amadou, 1994). Cette hypothèse expliquerait aussi la sénescence foliaire qui a débuté, pour toutes les variétés, plus précocement chez les plants de la 2^e date de semis (plus exposés à l'insuffisance de la pluviosité vers la fin de la saison) que chez ceux du 1^{er} semis.

En 2003, jusqu'à la dernière observation (faite le 05 novembre), le 2^e semis d'aucune des variétés n'avait atteint la maturité complète à 50 % des plants. Il en était de même pour le 1^{er} semis de la variété tardive (MTDO). En fait cette année, la date de la dernière observation a été précipitée par le fait que les plants étaient déjà asséchés, suite à l'arrêt définitif des pluies. Les poids secs des tiges, feuilles et épis des plants de toutes les variétés ont été plus élevés avec le 1^{er} semis qu'avec le second. Ceci traduit une sensibilité de ces variétés à la photopériode. En effet, avec le retard de semis, certaines variétés photosensibles de mil écourtent leurs phases de tallage, afin de parvenir à épier avant la fin de la saison (Franquin, 1987 ; Vaksman *et al.*, 1996 ; Traoré *et al.*, 1995 et 2000b). Avec un semis précoce, elles consacrent plus de temps à émettre des talles avant d'entamer la phase de montaison ; la durée du tallage étant encore beaucoup plus longue chez les variétés tardives. En outre, les changements thermiques au cours de la saison agricole (Maïdoukia, 1980 ; Santens, 1985 et Diop, 1999) et la nature du sol (De Rouw, 1994 ; Pandey *et al.*, 2001) peuvent également favoriser ou retarder la croissance de certaines variétés de mil. En effet, pendant leur croissance, la plupart des variétés ont la capacité de s'accommoder aux conditions du milieu de culture pour restreindre le nombre de leurs talles à la limite de celles qui sont aptes à donner des épis avant la fin de la saison. Ceci a été prouvé dans notre test, même si par ailleurs la production en matière sèche de toutes les variétés a connu une baisse importante en 2003, du fait de l'arrêt précoce des pluies et de la baisse de la fertilité résiduelle du sol.

10.1.2. Effet de l'apport d'urée

La variété tardive MTDO a des potentialités de production en biomasse aérienne plus élevées que celles de la variété semi-tardive ZATIB qui en produit aussi mieux que la précoce HKP (figures 27 à 32). En outre, ces figures montrent que l'apport d'urée a été favorable à

l'augmentation de la matière sèche des différents organes (tiges, épis et grains) de toutes ces trois variétés.

En 2002, la dose de 100 kg h^{-1} (N1) d'urée a permis une augmentation du poids sec des feuilles de la variété HKP d'environ 10 g m^{-2} par rapport au traitement témoin (N0), au 64^e JAS (figure 27). L'effet de l'urée a été plus significatif sur la matière sèche des tiges, à partir du 72^e JAS et sur le poids grains, à la dernière observation. Cependant, cette figure montre qu'au 72^e JAS, les feuilles ont entamé une sénescence qui a été un peu plus accentuée chez les plants fertilisés. Cette sénescence s'est soldée par une diminution progressive de la matière sèche des feuilles et une stabilisation de celle des tiges, pour tous les deux traitements d'urée (figure 27). Cette situation a affecté l'évolution des poids grains qui ont été les mêmes pour les deux traitements d'urée. Les mêmes variations ont été observées pour la variété semi-précoce (ZATIB), vis-à-vis de l'apport d'urée, en 2002 (figure 29). Cependant, la sénescence foliaire a été beaucoup plus importante chez les plants fertilisés de cette variété que chez ceux non fertilisés, à partir du 72^e JAS. Chez cette variété, on note aussi l'effet de l'urée qui a commencé à être significativement différent, pour la matière sèche des tiges, depuis le 45^e JAS jusqu'à la maturité. Toutefois, chez la variété ZATIB, le poids sec des grains a été nettement plus élevé chez les plants fertilisés que chez ceux non fertilisés, à la dernière observation. Chez la variété tardive de mil (MTDO), les variations obtenues en 2002 ont été les mêmes que chez les variétés HKP et ZATIB, particulièrement pour la matière sèche des tiges (figure 31). Pour la matière sèche foliaire de la MTDO, elle a été différente, selon l'apport d'urée, particulièrement vers le 72^e JAS, date à laquelle elle a entamé une chute continue jusqu'à la fin du cycle, pour tous les deux traitements d'urée. A l'instar de la HKP, les poids grains de la MTDO n'ont pas été différents, en fonction du traitement d'urée.

En 2003, l'effet de l'urée a été plus important sur l'évolution des poids secs des différentes composantes de la biomasse aérienne des trois variétés (figures 28, 30 et 32), à l'exception des poids des grains qui sont encore restés sensiblement les mêmes, pour les plants fertilisés et non fertilisés en urée de la variété HKP (figure 28). Les figures 28 et 30 montrent que les variétés HKP et ZATIB ont eu des poids secs foliaires inférieurs à ceux de 2002. En effet, pour la HKP, les valeurs maximales obtenues étant de 58 g m^{-2} et 47 g m^{-2} (au 56^e JAS), respectivement pour les deux traitements N1 et N0, contre 80 g m^{-2} et 68 g m^{-2} en 2002 (64^e JAS). Quant à la ZATIB, en 2003 elle a eu une biomasse foliaire maximale de seulement 51 g m^{-2} et 46 g m^{-2} (au 80^e JAS), respectivement les traitements d'urée N1 et N0, contre de 132 g m^{-2} et 110 g m^{-2} en 2002 (au 64^e JAS). Chez la variété tardive MTDO, la baisse de la biomasse foliaire entre 2002 et 2003 a été observée de façon importante, seulement chez les plants non fertilisés en urée (N0) : avec 75 g m^{-2} en 2003 (80^e JAS), contre 109 g m^{-2} au 72^e JAS en 2002 (figures 31 et 32).

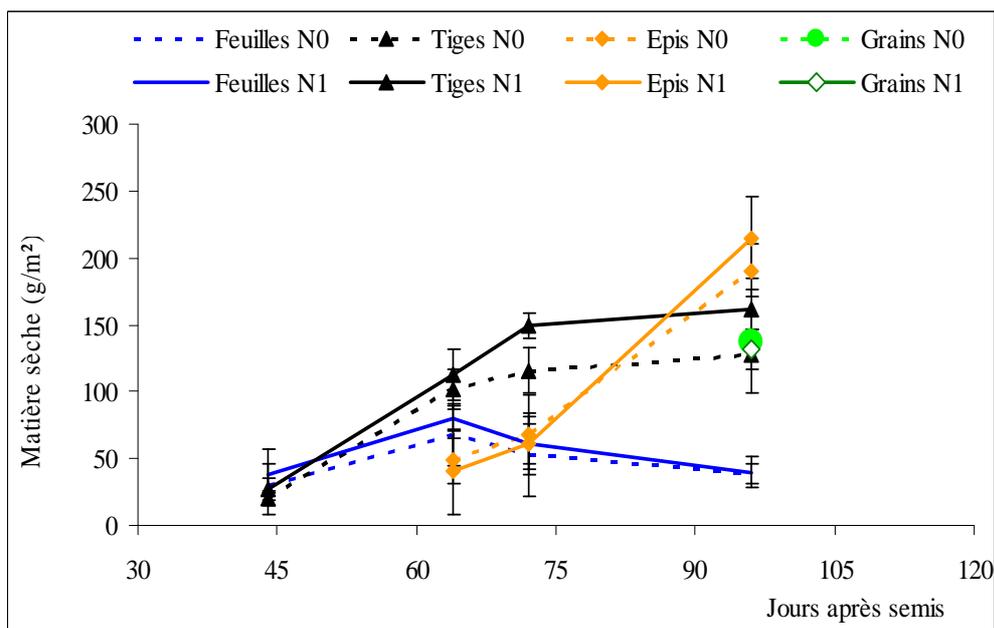


Figure 27 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété HKP en fonction du niveau d'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

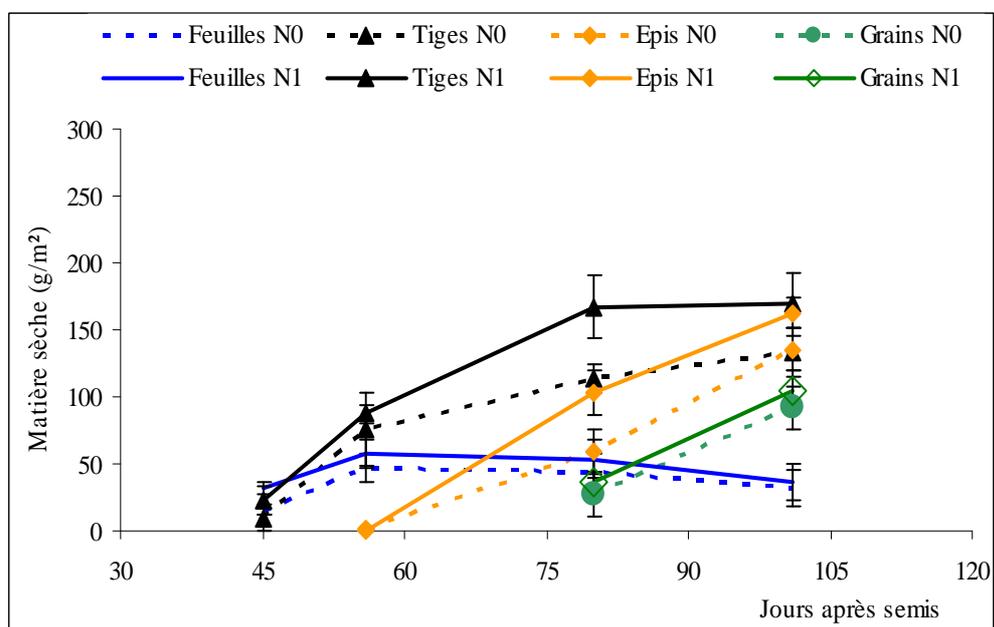


Figure 28 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété HKP en fonction du niveau d'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

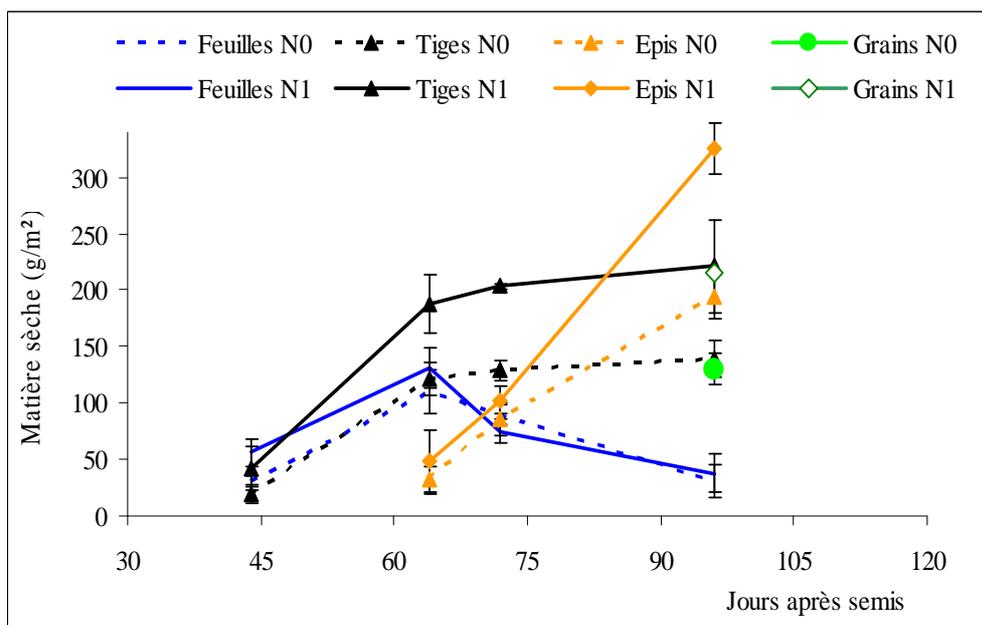


Figure 29 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété ZATIB en fonction du niveau d'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

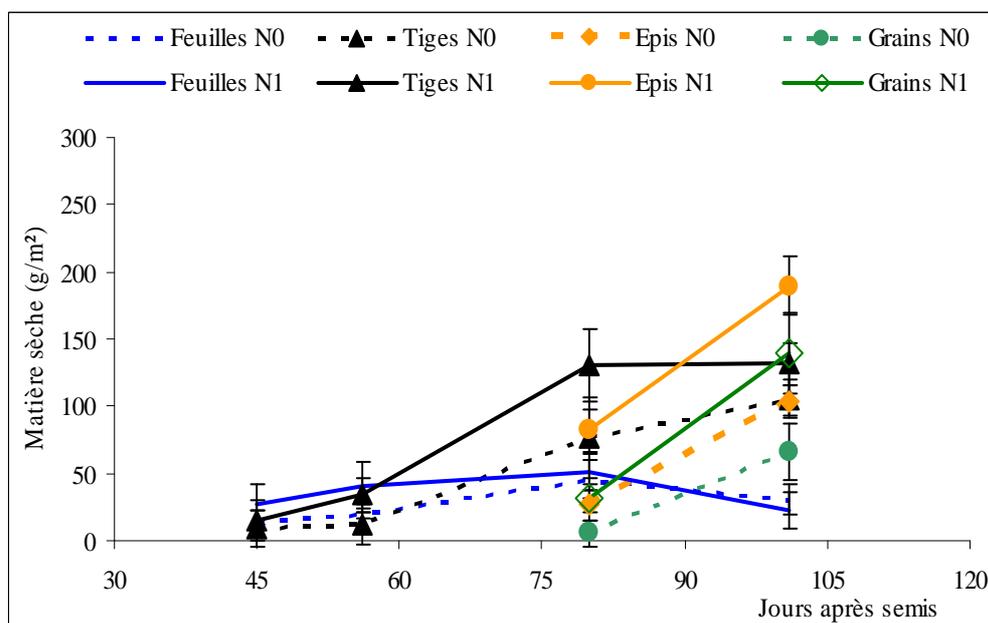


Figure 30 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété ZATIB en fonction du niveau d'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

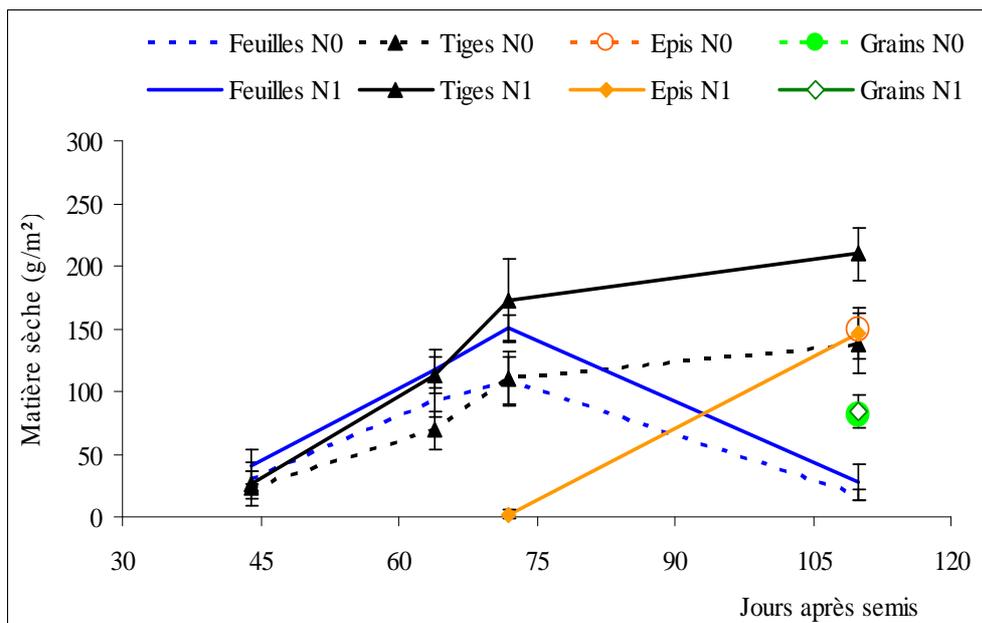


Figure 31 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété MTDO en fonction du niveau de fertilisation azotée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

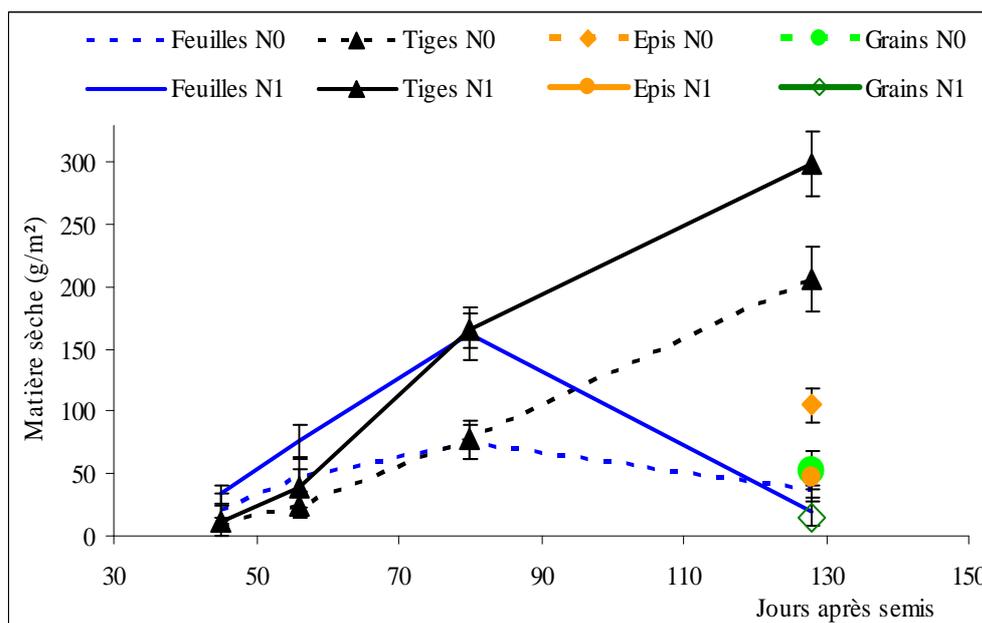


Figure 32 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne de la variété MTDO en fonction du niveau d'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

Il ressort de ces résultats que l'urée a permis l'augmentation de la matière sèche des feuilles, tiges, épis et grains des 3 variétés. En 2002, l'importante sénescence des feuilles des plants des différents traitements, à partir du 72^e JAS, s'explique par l'impact des épisodes secs observés pendant le mois d'août et surtout de septembre. En effet, ces périodes secs ont provoqué un déficit hydrique qui a accru la mortalité des feuilles des plants, notamment ceux fertilisés dont la biomasse foliaire avait été augmentée par l'urée. En dépit du déficit en eau, les plants stressés ont pu continuer leur croissance avec la reprise des pluies en octobre. Toutefois, les pluies recueillies tardivement en octobre 2002 n'ont permis qu'aux brins maîtres des plants et à quelques talles plus développées de produire des épis ; les talles peu développées ayant séché sous l'effet du stress hydrique. Ceci a contribué à diminuer la matière sèche au niveau des plants, aussi bien des traitements fertilisés, que de ceux non fertilisés. En définitive, ces épisodes secs, vécus pendant les phases critiques d'épiaison et de floraison, ont affecté la rentabilité des variétés testées, dont les plus exposées sont celles à cycles plus longs (ZATIB et MTDO). En 2003, il n'y a pas eu de déficit hydrique important pendant la phase de la croissance végétative des plants, mais les poids secs des organes des différentes variétés ont été diminués par rapport à ceux obtenus en 2002. Ceci serait lié, d'une part à la baisse de la fertilité initiale du sol et d'autre part à l'arrêt précoce des pluies en 2003. Le déficit hydrique créé par l'arrêt précoce des pluies a eu plus d'impact sur la production en épis et en grains des variétés ZATIB et MTDO, particulièrement chez les plants fertilisés en urée dont les feuilles ont connu une sénescence plus accélérée vers la fin du cycle. Ceci montre l'effet négatif de l'azote sur les cultures exposées au risque de déficit hydrique au cours de leur cycle. La variété la plus exposée à ce risque est la MTDO. En effet, pour des poids secs de tiges plus élevés, les plants fertilisés de cette variété ont donné des poids d'épis et de grains égaux à ceux des plants non fertilisés en 2002 et plus faibles en 2003. Ceci, du fait qu'il y a eu plus de talles avortées chez les plants fertilisés que chez ceux non fertilisés. Des résultats similaires ont été trouvés par Sogodogo et Shetty (1991) et Herrmann *et al.*, (1994) qui ont indiqué que l'effet positif de l'azote sur la productivité du mil dépend de la disponibilité en eau. D'autres études ont aussi montré qu'un déficit hydrique en fin de cycle réduit ou annule les effets positifs des techniques de rehaussement des rendements du mil telle que : l'apport d'azote (Dancette, 1979 ; Cissé, 1986), le travail du sol (Chopart et Koné, 1994), ou l'utilisation des variétés améliorées (Vaksmann *et al.*, 1996). Face à cette situation, Bley (1990) a considéré l'eau, comme étant le facteur décisif pour le succès des cultures au Sahel. Tout de même, il ressort de cette étude que la variété tardive MTDO est plus performante en production de biomasse foliaire, suivie de la ZATIB et HKP, sous tous les traitements d'urée. En ce qui concerne les poids des épis et des grains, la ZATIB a toujours été la plus performante et la MTDO la moins performante, à cause de son plus long cycle, ne répondant pas bien aux courtes saisons de pluies qui caractérisent le milieu de culture.

10.1.3. Effets de la densité de semis et de l'apport d'urée

❖ En conditions hydriques pluviales strictes

Seule la variété de mil ZATIB a été soumise aux effets conjugués de la densité de semis et de l'apport d'urée. Avec la forte densité de semis, tous les organes (feuilles, tiges, épis et grains) ont vu leur production en matière sèche baisser, aussi bien en 2002 qu'en 2003 (figures 33 à 37). En l'absence d'apport d'urée, l'augmentation de la densité de semis a eu un impact négatif sur l'accumulation de matière sèche, au niveau de tous les organes de cette variété.

En 2002, le traitement D1 (16 666 plants ha⁻¹) croisé avec N0 (0 kg d'urée ha⁻¹) a donné, au dernier prélèvement, 151 g m⁻² d'épis et 118 g m⁻² de grains contre 99 g m⁻² et 65g m⁻², respectivement pour le traitement D2 (31 250 plants ha⁻¹) dans les mêmes conditions de fertilité du sol (N0). Pour les traitements ayant reçu l'urée, les résultats 2002 (figure 35) montrent qu'à partir du 67^e JAS, la matière sèche a été significativement plus élevée chez les organes des plants semés à faible densité, exceptés les épis et grains. Comparativement au traitement N0 (figure 33), on constate qu'en 2002, l'apport d'urée a entraîné une réduction des écarts entre la matière sèche des épis et les grains des deux densités de semis. Toutefois, à partir du 67^e JAS, les écarts ont été augmentés pour les feuilles et les tiges (figure 35). Chez les parcelles n'ayant pas reçu l'urée, les écarts ont été significatifs particulièrement vers le 75^e JAS, pour les feuilles et à la maturité, pour les épis et grains (figure 33).

En 2003, on note une diminution importante de la matière sèche produite par les différents traitements, par rapport à 2002. Par exemple, pour le traitement D1 la matière sèche des épis a baissé de 41 g m⁻² et celle des grains de 31 g m⁻². Au niveau du traitement D2, les diminutions ont été de 37 g m⁻² et 27 g m⁻². Toutefois, en dépit de cette baisse, les poids secs des différents organes ont évolué dans la même logique qu'en 2002 (figure 36).

❖ En conditions d'irrigations complémentaires

En conditions irriguées, l'accumulation de biomasse aérienne des traitements de densité de semis a été améliorée, aussi bien en présence qu'en l'absence d'urée (figures 37 à 40). Ces figures montrent que la baisse de la fertilité initiale du sol a aussi affecté les plants irrigués. En effet, en 2003 les poids secs des différents organes ont été inférieurs à ceux de 2002, pour tous les traitements. Pour toutes les deux années d'essai, les poids secs des feuilles et tiges ont été différents, selon la densité de semis, à partir du 67^e JAS, en 2002 et du 56^e JAS, en 2003 (figures 37 à 40). Toutefois, en 2003 les poids secs des tiges des deux densités de semis n'ont pas été différents au 69^e JAS, dans les parcelles n'ayant pas reçu l'urée (figure 38). Quand aux poids secs des épis et grains obtenus en 2002, ils ont été différents, selon la densité de semis, seulement dans les parcelles ayant reçu l'urée (figures 37 et 39). En 2003, ils ont été affectés par la densité de semis, dans toutes les parcelles irriguées, (figures 38 et 40).

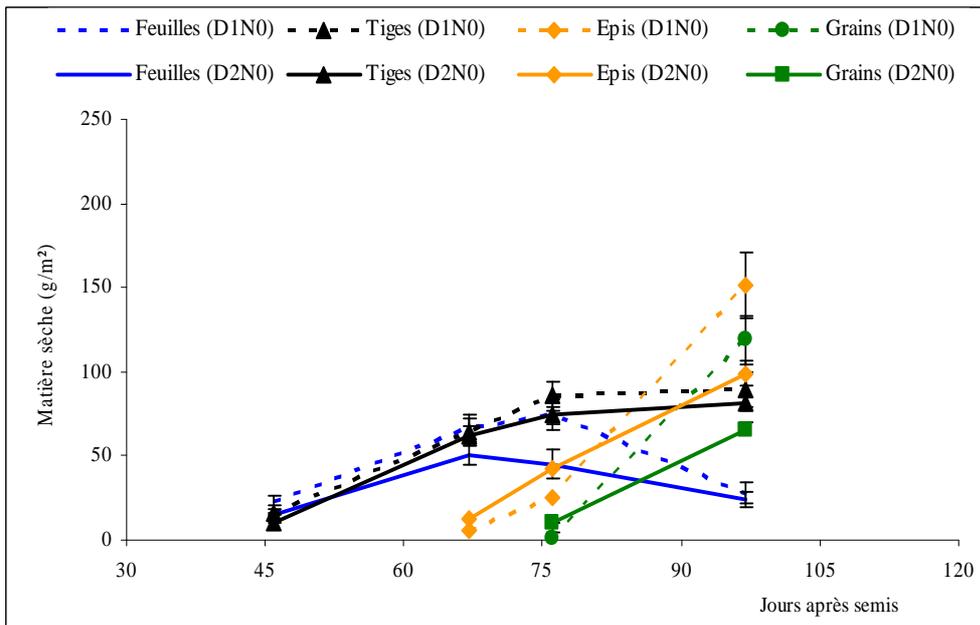


Figure 33 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol non fertilisé en conditions pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

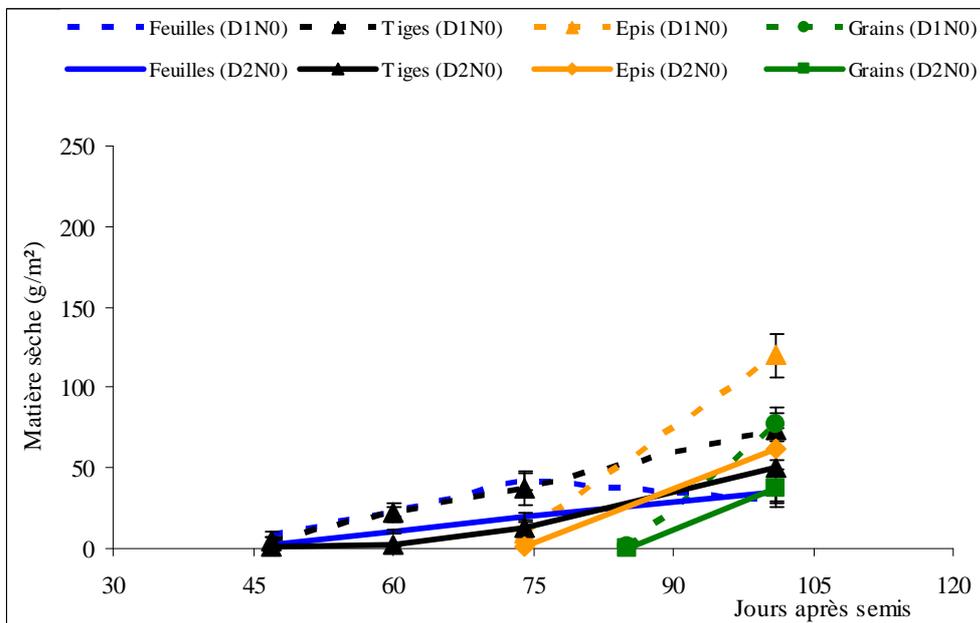


Figure 34 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol non fertilisé en conditions pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

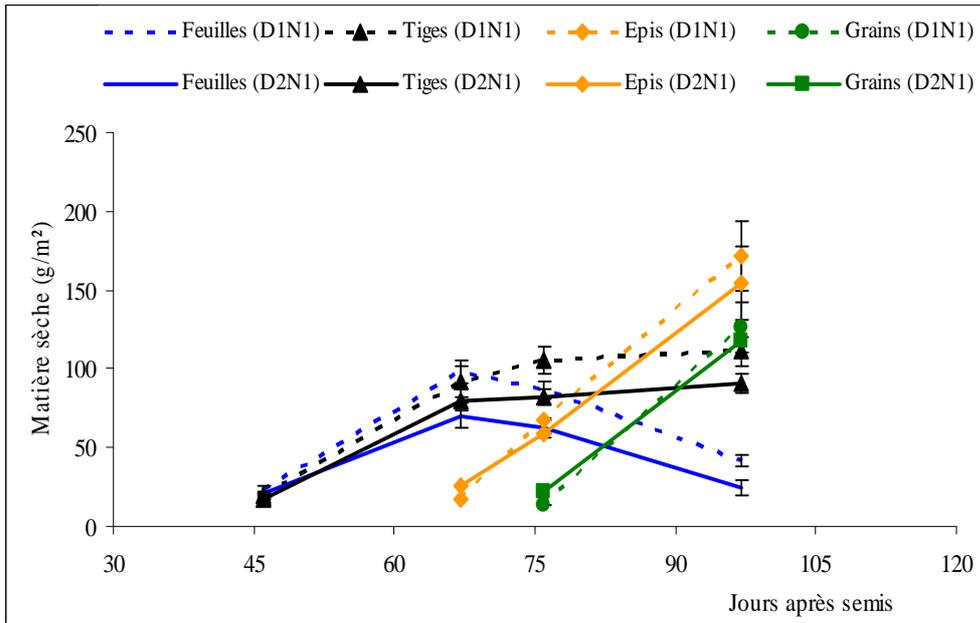


Figure 35 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol fertilisé en urée en conditions pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

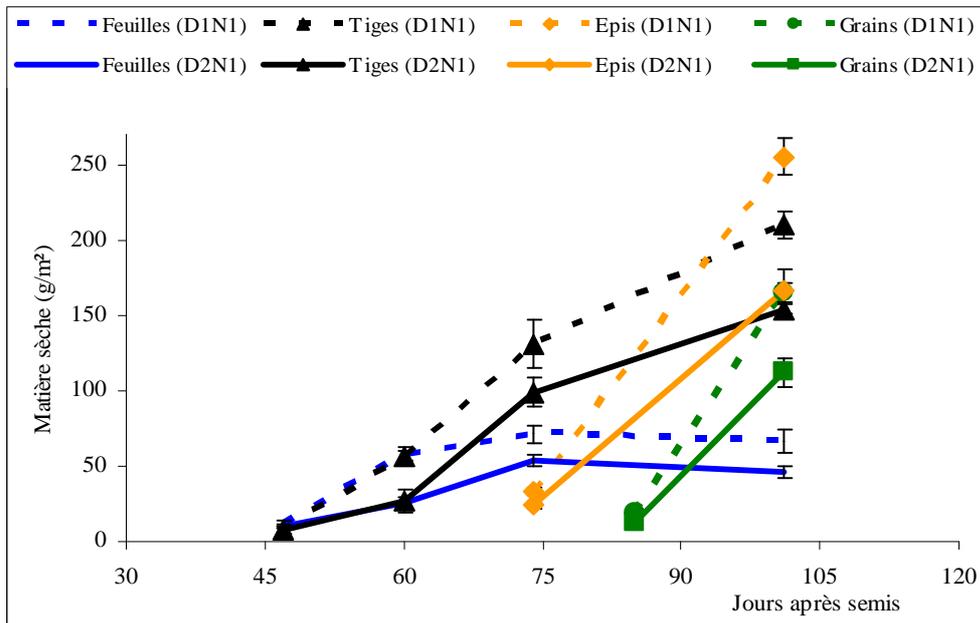


Figure 36 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol fertilisé en urée en conditions pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

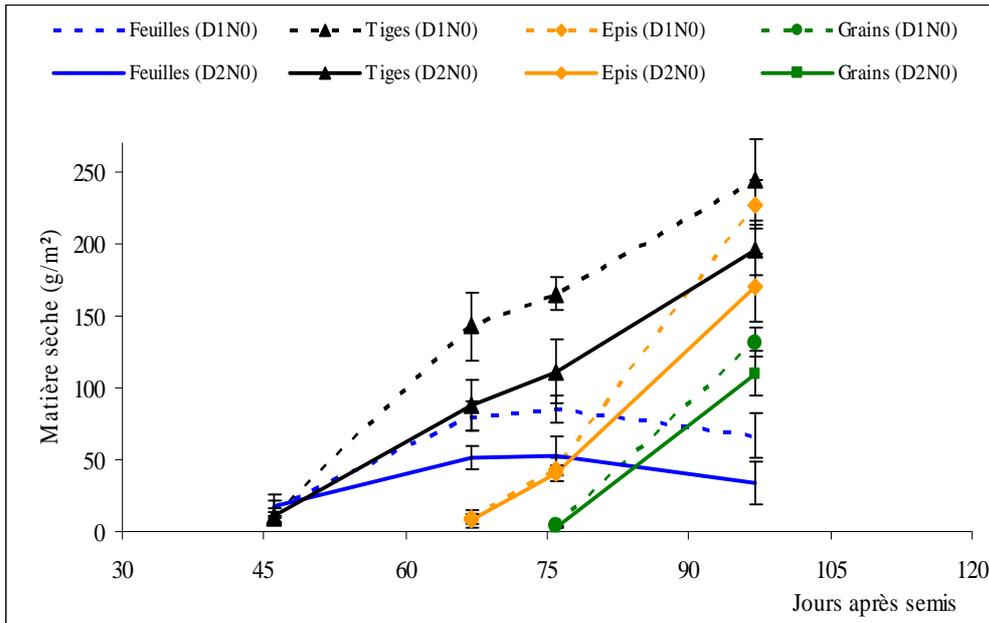


Figure 37 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol non fertilisé en irrigué ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

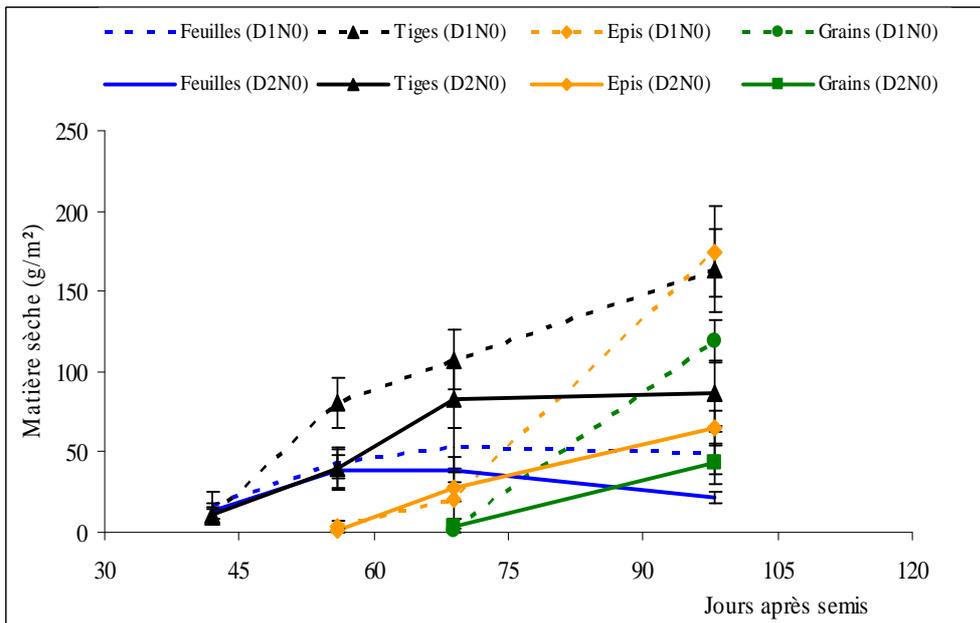


Figure 38 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol non fertilisé en irrigué ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

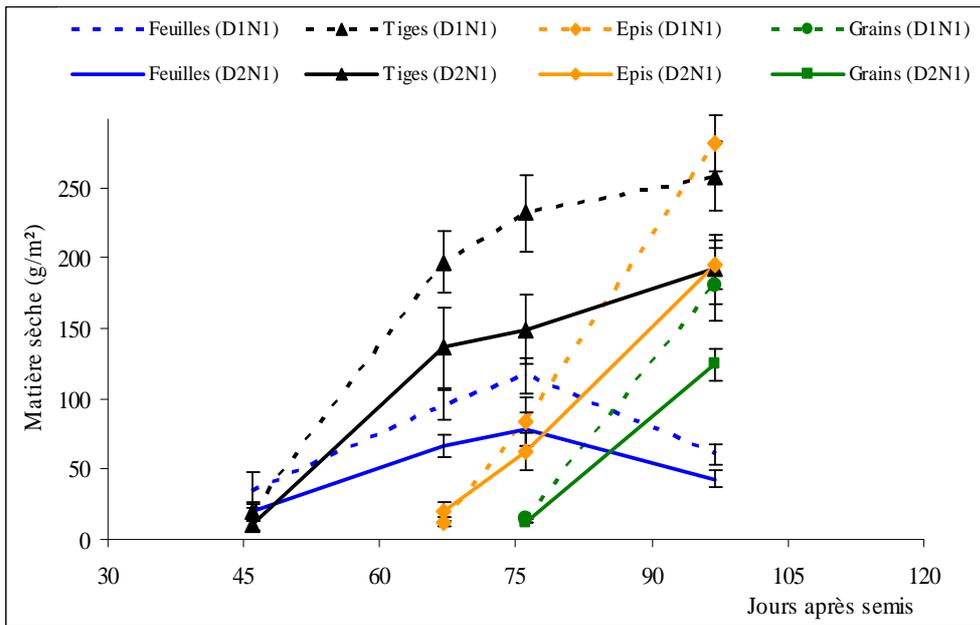


Figure 39 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol fertilisé en irrigué ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

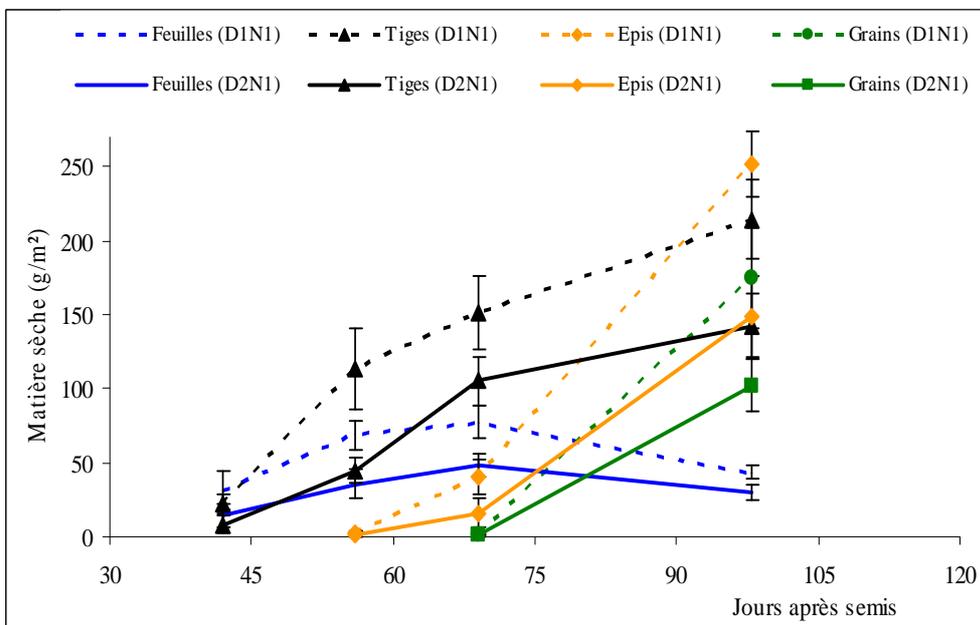


Figure 40 : Evolution du poids sec (g m^{-2}) des composantes de la biomasse aérienne en fonction de la densité de semis, sur un sol fertilisé en irrigué ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

Il ressort de ces résultats qu'en l'absence d'apport d'urée, l'augmentation de la densité de semis a un impact négatif sur l'accumulation de matière sèche de la variété de mil ZATIB. En outre, chez les traitements ayant reçu l'urée, l'accumulation de matière sèche a été toujours plus élevée chez les plants semés à faible densité. Chez ces plants, il y a eu une augmentation d'écart de matière sèche des feuilles et des tiges entre les deux densités de semis, qui serait liée à l'effet positif de la densité sur le développement de talles en situation d'apport d'urée. Cependant, pour les épis et grains de ces plants (fertilisés), il a été observé une réduction des écarts par rapport à ceux non fertilisés. Ceci indique que les talles ont été plus productives dans les parcelles ayant reçu l'urée que dans celles ne l'ayant pas reçu. Il est en outre ressorti des résultats, une baisse de production de matière sèche, de 2002 à 2003, qui a été plus accentuée au niveau des traitements n'ayant pas reçu de l'urée. Ceci traduit la grande variation inter annuelle de la fertilité résiduelle des sols sahéliens, comme l'ont aussi remarqué Bagayoko *et al.*, (2000) et Buerkert *et al.* (2001).

Ces résultats montrent que, dans le contexte sahélien où l'insuffisance de l'eau et la pauvreté des sols sont notoires, l'interaction entre la densité de semis et la fertilisation du sol figure parmi les principaux paramètres dont dépend la réussite de la culture du mil. En effet, cette étude a permis de justifier la recommandation de Anonyme (1993), en montrant que la diminution de la densité de semis est plus favorable au développement du mil sur les sols de fertilité moyenne et/ou insuffisante. En effet, la réduction du nombre de poquets sur un sol pauvre permet un meilleur développement des plants en minimisant leur compétition vis-à-vis de l'eau et des substances nutritives, contrairement aux fortes densités de semis. Toutefois, il existe une densité seuil, en dessous de laquelle, même si on a un développement optimal des plants du fait d'une compétition moindre entre les plants pour l'eau et les nutriments, un très faible nombre de plants dans une parcelle donnée peut entraîner une baisse globale de rendement. Dans cette étude, l'apport d'urée a permis d'augmenter la biomasse aérienne des plants de la forte densité de semis, même si par ailleurs les poids secs des différents organes étaient moins élevés que ceux des plants plus espacés. Cette situation résulterait du fait que, soit la dose d'urée apportée a été insuffisante pour permettre aux plants de la forte densité de semis d'atteindre leur productivité potentielle en biomasse aérienne, soit le stress hydrique (observé en septembre 2002) a eu plus d'impact sur les plants fertilisés et densément semés (Diouf *et al.*, 2004). Toutes les deux hypothèses peuvent être valables, mais la dernière se vérifie plus par le fait qu'en 2002 il a été observé une chute brusque (vers le 70^e JAS), des poids secs des feuilles et tiges, qui coïncide bien avec l'épisode sec du mois de septembre qui aurait affecté le développement des plants sous les traitements intensifiés. Cet épisode serait à la base de la baisse du poids sec des épis et grains du traitement fertilisé et plus dense, par rapport au traitement également fertilisé mais moins dense. Il serait également responsable du

fait que les poids secs des grains des traitements de la faible densité de semis aient été presque les mêmes en 2002, quel que soit le niveau d'urée. Ceci montre que le stress hydrique affecte plus les plants fertilisés, dont les besoins en eau étaient plus élevés à cause d'une biomasse aérienne plus abondante. En effet, le stress hydrique accélère la mort des talles et augmente le taux d'avortement des épis, particulièrement chez les plants fertilisés ; d'où la diminution du poids sec des grains au niveau des traitements fertilisés par rapport à ceux non fertilisés d'une même densité de semis. Sogodogo et Shetty (1991) et Laouan (1996) sont parvenus aux mêmes conclusions, en indiquant que les niveaux élevés de fertilisation azotée favorisent la multiplication des feuilles et des talles qui n'arrivent pas à maturité en cas de stress hydrique de fin de cycle, limitant ainsi la production en grains de la culture.

En 2003, le rendement grain du traitement de la faible densité de semis a été nettement plus élevé en présence qu'en l'absence d'apport d'urée ; du fait certainement des pluies plus régulières qu'en 2002. Ces résultats concordent avec ceux de Anonyme (1993) et Laouan (1996) qui indiquent que le rendement en grain du mil n'est pas linéairement croissant avec le niveau de fertilisation du sol, parce qu'en dehors de la fertilisation, il est aussi lié à la disponibilité en eau, et à la densité de semis pour une même variété. En effet, en 2003, l'absence de stress hydrique de mi-parcours a permis à l'urée d'être plus favorable à l'accumulation de matière sèche, surtout dans les parcelles à faible densité de semis. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Coaldrake et Pearson (1985), Flesch et Dale (1988), Payne *et al.* (1990) et Vachaud et Klaij (1992). La seule sécheresse vécue au cours de cette année 2003 a été sans impact sur l'essai, parce qu'elle s'est installée vers la fin de la saison, au moment où les épis des plants étaient presque mûrs.

Cependant, pour réduire la vulnérabilité des plants au manque d'eau pendant leur croissance et assurer un bon développement de la biomasse aérienne, il vaut mieux associer à l'apport d'urée des densités de semis relativement faibles. Coulibaly *et al.* (1988), sont parvenus aux mêmes conclusions, lorsqu'ils indiquaient que les fortes densités de semis, associées aux fortes doses d'azote, provoquent une mortalité plus élevée des talles et un mauvais remplissage des grains par rapport aux faibles densités, en cas de déficit hydrique.

Par ailleurs, les résultats ont montré que la baisse de fertilité du sol a également affecté les plants soumis aux irrigations complémentaires, dont les poids secs des différents organes en 2003 ont été inférieurs à ceux de l'année précédente. Dans les parcelles irriguées, les valeurs de matière sèche ont été plus élevées qu'en conditions pluviales strictes, pour le même traitement. Cependant, il ressort que, lorsque la fertilité du sol est insuffisante, les fortes densités de semis deviennent les moins performantes dans la production de feuilles, tiges, épis et grains, même lorsque l'eau est disponible. Ceci est conforme aux résultats obtenus par Buerkert *et al.*, (2001).

Ainsi, la densité de semis présente un enjeu important dans la gestion des pratiques culturales pour une meilleure amélioration de la productivité du mil. Elle doit être faible, indépendamment du facteur hydrique, particulièrement pour les sols pauvres, et son augmentation pour un accroissement de la production nécessite logiquement une amélioration de la fertilité du sol et de la disponibilité en eau. Les résultats obtenus sous les traitements fertilisés (et bénéficiant d'irrigations complémentaires) ont montré, à travers leurs variations, que la dose de 100 kg ha⁻¹ d'urée apportée n'a pas été suffisante pour améliorer la productivité de la variété testée sous la forte densité de semis. Il s'agit là d'un phénomène préoccupant qui caractérise tous les sols sahéliens. Ainsi, malgré la volonté d'augmentation de la production agricole au Sahel à travers l'amélioration de la fertilité azotée des sols, il y a lieu de considérer le risque que l'effet positif de l'apport d'urée soit souvent rendu hypothétique dans cette zone où les pluies sont irrégulières et très mal réparties dans le temps et dans l'espace. D'où la difficulté de stabiliser les rendements du mil d'une saison à l'autre, autour d'un seuil voulu, par le biais de l'amélioration des pratiques culturales (Cortier *et al.*, 1988). Cependant, l'apport d'une quantité suffisante d'urée, associé à une densité de semis faible ou modérée, permettrait de mieux rehausser les rendements de cette culture sous des conditions hydriques incertaines.

10.2. Evolution de l'indice de surface foliaire (LAI)

10.2.1. Effet de la date de semis

En 2002, les variétés précoce (HKP) et semi-précoce (ZATIB) ont donné des valeurs de LAI largement plus élevées avec le semis tardif qu'avec le semis précoce (figure 41). En effet, la HKP et la ZATIB ont donné, avec le semis tardif, des pics respectifs de 1,6 et 2,1 de LAI au 51^e JAS, contre 1,0 et 1,3 respectivement pour les mêmes variétés au 79^e jour après le semis précoce. La figure 41 montre que, seule la MTDO à cycle long a donné un LAI plus important avec le semis précoce (3,5) qu'avec le semis tardif (2,5), cette année.

En 2003, les variétés HKP et ZATIB ont eu des LAI plus élevés avec le semis précoce qu'avec celui tardif, contrairement à 2002 (figure 42). Quant au LAI de la variété MTDO, il a varié dans le même sens qu'en 2002, avec des valeurs de 2,5 et 2,0, respectivement pour le 1^{er} et le 2^e semis. Les résultats des deux années d'expérimentations montrent que la variété à cycle long (MTDO) développe plus de LAI que celle à cycle semi-tardif (ZATIB), qui en développe plus que la HKP à cycle précoce (figures 41 et 42). Ces figures montrent également qu'en 2003 le LAI de toutes les variétés a connu un développement plus lent et une chute plus rapide, par rapport à 2002.

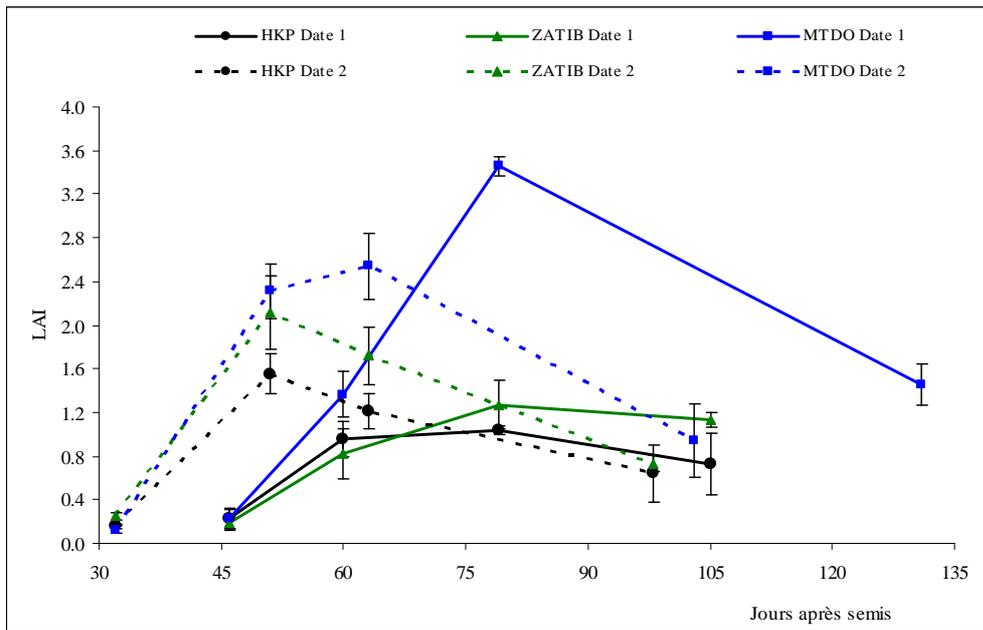


Figure 41 : Evolution du LAI des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet*). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

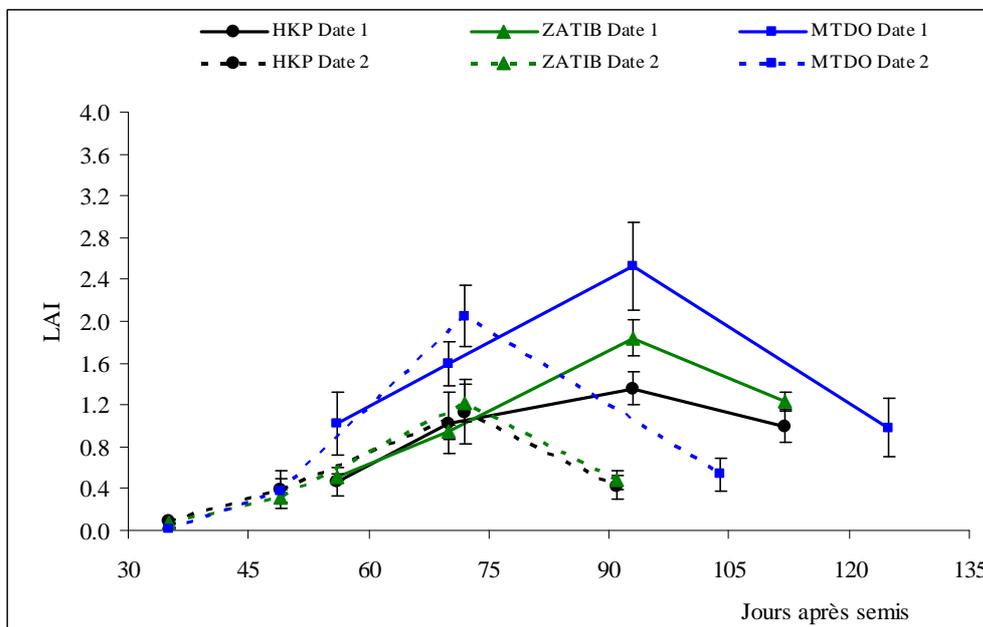


Figure 42 : Evolution du LAI des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet*). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

L'augmentation rapide du LAI, observée en 2002 au niveau du 2^e semis des trois variétés, était due à une émission de talles et feuilles mieux développées qu'au niveau du semis précoce. Ceci s'expliquerait par les pluies tardives d'octobre 2002 dont ont bénéficié les plants du 2^e semis, en ralentissant notamment la sénescence de leurs feuilles. Les plants du 1^{er} semis ont par contre souffert des épisodes secs des mois d'août et de septembre. En 2002, seule la variété MTDO a donné plus de LAI avec le semis précoce. Ceci s'explique par le fait que, lors de l'avènement des épisodes secs, les plants de cette variété tardive étaient à un stade de développement (avant la montaison) pendant lequel ils sont encore moins sensibles au stress hydrique. En effet, la MTDO est une variété qui consacre assez de temps à développer des talles, avant d'entamer la phase de la montaison ; ce qui lui permet de rester moins sensible aux stress hydriques de milieu de saison, pour être en revanche plus exposée à ceux de fin de saison. De par sa capacité de tallage massif et de croissance en hauteur inégale, cette variété tardive a la potentialité de produire plus de biomasse foliaire que les deux autres, à cycles plus réduits. Le fait qu'en 2003, les variétés HKP et ZATIB aient donné plus de LAI avec le semis précoce, s'expliquerait par l'arrêt précoce des pluies à partir du 19 septembre 2003, soit un mois plus tôt qu'en 2002.

En définitive, le décalage du semis a entraîné des variations dans le développement du LAI de chacune des trois variétés. Elles ont réagi aux conditions du milieu, en réduisant ou augmentant leur développement et leur croissance, selon la date de semis, la durée restante pour la saison des pluies et la fertilité du sol (Pandey *et al.*, 2001). Toutefois, l'impact des facteurs climatiques est le plus évident, sur les variations intra et inter-saisonniers observées du LAI. Ceci permet d'évoquer, outre la contrainte hydrique, le phénomène du photopériodisme par lequel, selon Franquin (1987); Traoré *et al.*, (1995) et Vaksman *et al.*, (1996), les variétés photosensibles de mil réduisent leur cycle, leur croissance et leur développement foliaire pour privilégier leur reproduction en prévision de la fin de la saison des pluies.

10.2.2. Effet de l'apport d'urée

L'apport d'urée a en général été favorable à l'augmentation du LAI chez toutes les variétés (figures 43 et 44) et pendant toutes les deux saisons d'expérimentation. En effet, la figure 43 montre qu'au démarrage de la saison 2002, l'apport d'urée a permis à toutes les variétés d'avoir des valeurs de LAI largement plus élevées que celles du traitement non fertilisé. La variété tardive (MTDO) et celle semi-tardive (ZATIB) ont eu les meilleurs LAI, de la date de semis au 100^e JAS. Cependant, à partir du 60^e JAS, le LAI a connu une chute importante uniquement chez les variétés précoce (HKP) et semi-tardive (ZATIB). Cette perte de LAI a été encore plus accrue chez les traitements fertilisés que chez ceux non fertilisés des mêmes variétés. Cependant, cette chute de LAI a été un peu amortie par une légère reprise du

développement foliaire, vers la fin du cycle (figure 43). Quant à la variété MTDO, elle a connu une chute massive et irréversible de son LAI, vers la fin de la saison (figure 43). Le même phénomène a été observé pour cette variété en 2003 mais, cette fois-ci avec un impact plus accru chez le traitement fertilisé (figure 44). Les figures 43 et 44 montrent qu'en 2003 le traitement fertilisé de la variété MTDO a donné une valeur maximale de LAI (4,14 au 80^e JAS) qui est plus élevée qu'en 2002 (3,83 au 72^e JAS). Par contre, chez les variétés HKP et ZATIB, les valeurs maximales de LAI obtenues sous le traitement fertilisé ont été plus élevées en 2002 (1,49 et 2,84, respectivement pour les deux variétés au 64^e JAS) qu'en 2003 (1,09 pour la HKP au 56^e JAS et 1,11 pour la ZATIB au 80^e JAS). Ces chiffres montrent que les LAI des variétés HKP et ZATIB, ont connu une baisse significative en 2003, par rapport à 2002. La même variation a été observée au niveau des traitements non fertilisés de toutes les trois variétés (figures 43 et 44). Toutefois, en 2003 l'évolution du LAI n'a pas été aussi perturbée qu'en 2002.

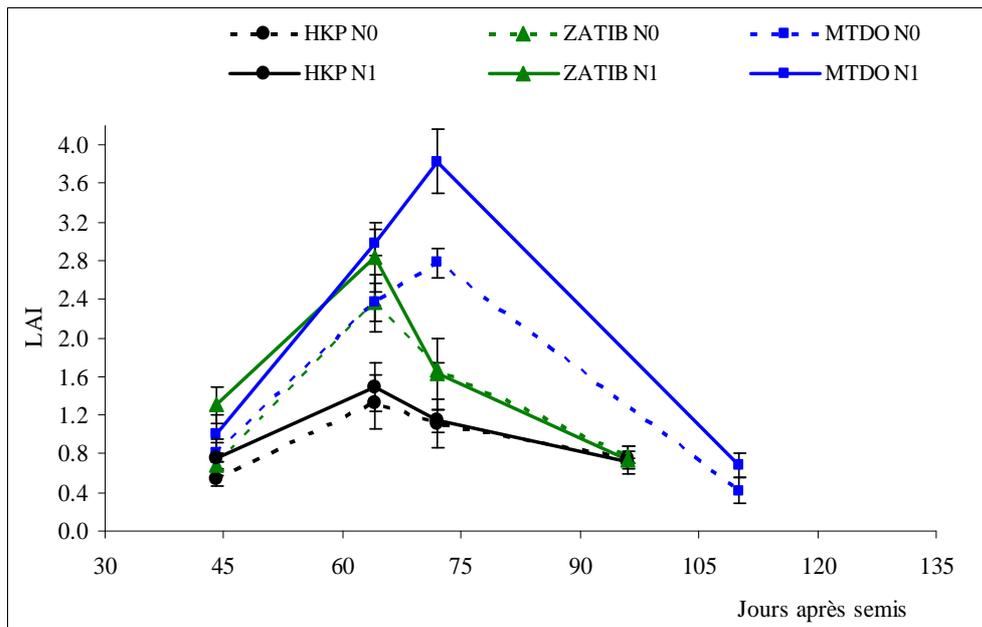


Figure 43 : Evolution du LAI des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la fertilisation azotée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

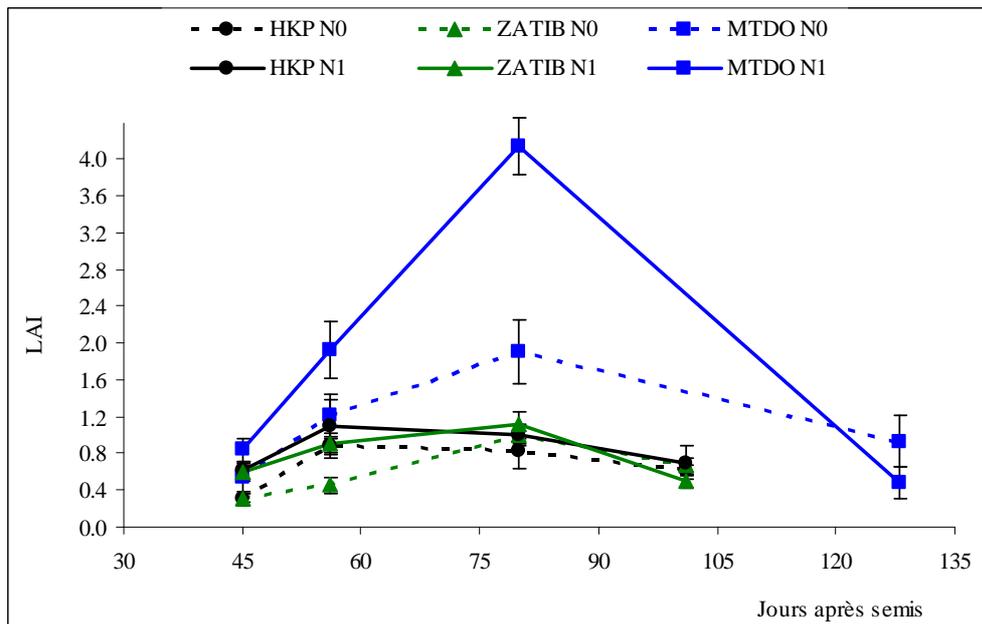


Figure 44 : Evolution du LAI des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

Ces résultats montrent que, pendant les deux périodes d'expérimentation, l'apport d'urée a augmenté le LAI de toutes les variétés, en conformité avec les résultats obtenus par (Bacci *et al.*, 1998). La chute importante qu'ont connu les LAI des variétés précoce (HKP) et semi-tardive (ZATIB), s'explique toujours par l'effet des épisodes secs observés en 2002 et qui ont plus affecté les plants fertilisés (dont l'urée a augmenté le développement foliaire avant la sécheresse) que ceux non fertilisés. Des résultats similaires ont été obtenus par Diouf (2000) et Diouf *et al.*, (2004). Cependant, après les épisodes secs, les pluies tardives d'octobre ont permis la reprise du développement foliaire, chez les variétés HKP et ZATIB. En effet, les nouvelles conditions d'humidité créées par le retour des pluies ont permis aux plants de ces variétés, étant déjà en épiaison, de développer des talles tardives, donc de nouvelles feuilles, pour augmenter leur LAI. Quant à la variété MTDO, en dépit de leur développement foliaire plus exubérant, ses plants n'ont pas été affectés par le déficit hydrique. Ceci s'explique par le fait qu'au moment des épisodes secs de mi-parcours, cette variété tardive était encore au stade de tallage. Les pluies tardives d'octobre lui ont certes permis de continuer à augmenter son LAI jusqu'en début épiaison, mais elles n'ont tout de même pas été suffisantes pour lui permettre de garder assez de feuilles sur ses plants jusqu'à la récolte. Dans cet essai, le LAI a également baissé, de 2002 à 2003, mais seulement pour les plants fertilisés et non fertilisés en urée des variétés HKP et ZATIB. Pour la variété MTDO, cette baisse a été observée seulement chez les plants non fertilisés en urée, cela à cause probablement de la baisse de la fertilité initiale du sol déjà soulignée plus haut. En dépit des pluies qui ont été plus régulières qu'en 2002, la campagne 2003 a été caractérisée par un stress hydrique de fin de saison qui a affecté la variété MTDO dont le LAI, nettement plus élevé avec les traitements fertilisés vers le début du cycle, a baissé jusqu'à être pratiquement le plus faible à la dernière observation. Ce phénomène est bien prévisible, du fait que l'apport d'urée a été très favorable à l'augmentation du LAI, donc des besoins en eau des plants de ce traitement ainsi devenu le plus vulnérable à la sécheresse (Witt, 1981 ; Somé, 1990 ; Kaushik et Gautam, 1994 ; Diouf *et al.*, 2004). Ceci montre la facette négative de l'effet de la fertilisation azotée sur cette culture conduite dans des conditions hydriques insuffisantes.

10.2.3. Effet de la densité de semis et de l'apport d'urée

❖ En conditions pluviales strictes

Les valeurs de LAI analysées dans cette partie concernent uniquement la variété semi-tardive (ZATIB) du mil. Elles ont été estimées à partir de la surface foliaire de 5 poquets consécutifs occupant 6 m² de surface du sol pour la faible densité de semis (D1) et 4 m² pour la forte densité de semis (D2). Dans les conditions de culture pluviales strictes, l'apport d'urée a très significativement affecté l'évolution du LAI, tout le long du cycle en 2002 et 2003 (figures 45 et 46). Toutefois, en 2002 l'effet de l'urée sur l'évolution du LAI a été significativement

différent, dans les parcelles de la faible densité de semis (D1), seulement entre le 45^e et 75^e JAS (figure 45). Quant à l'effet de la densité de semis, il a été significatif, seulement dans les parcelles ayant reçu l'urée, en 2002. En effet, la figure 45 montre que l'apport d'urée a permis une démarcation entre la forte densité de semis pour laquelle les valeurs de LAI ont été plus élevées que celles de la faible densité de semis. La même tendance a été observée en 2003, du 75^e JAS à la fin du cycle. Par ailleurs, la figure 45 montre une chute brutale du LAI, à partir du 70^e JAS chez les plants ayant reçu l'urée et un peu tardivement vers le 78^e JAS chez ceux ne l'ayant pas reçu. Comme déjà constaté dans les résultats antérieurs, les valeurs maximales de LAI obtenues en 2003 ont été inférieures à celles enregistrées en 2002, particulièrement entre le 60^e et le 70^e JAS (figures 45 et 46). Ces figures montrent que, vers le début du cycle, le développement du LAI a été plus lent en 2003 qu'en 2002, cela particulièrement dans les parcelles n'ayant pas reçu l'urée de la forte densité de semis.

❖ En conditions d'irrigations complémentaires,

L'évolution du LAI a été meilleure qu'en conditions pluviales strictes, dans tous les traitements, en 2002 et seulement dans ceux non fertilisés, en 2003 (figures 47 et 48). Avec les irrigations complémentaires, l'effet de l'urée sur l'évolution du LAI a été pratiquement le même qu'en conditions pluviales strictes de culture. Toutefois, on note qu'en 2002, le LAI du traitement fertilisé de la faible densité de semis (N1D1) n'a commencé à être significativement différent de celui du traitement non fertilisé de la même densité de semis (N0D1), qu'après le 60^e JAS, pendant l'épiaison plus précisément (figure 47). En 2003, une différence a été observée entre ces deux traitements, du 50^e JAS à la fin du cycle (figure 48). Dans les conditions d'irrigations complémentaires également, l'effet de la densité de semis a été significatif, seulement dans les parcelles ayant reçu l'urée, en 2002. Cependant, en comparaison avec les résultats obtenus en pluvial strict, il a été observé une inversion de tendance dans l'évolution du LAI, entre les parcelles non fertilisées des deux densités de semis. En effet, le LAI a été constamment plus élevé dans les parcelles D2N0 que dans celles D1N0, jusqu'au 90^e JAS (figures 47 et 48). Les figures 49 et 50 montrent que les apports additionnels d'eau ont bien permis d'améliorer le développement du LAI de la variété testée, aussi bien en 2002 qu'en 2003. Ceci, en dépit de la variabilité des valeurs du LAI entre les deux années d'expérimentation.

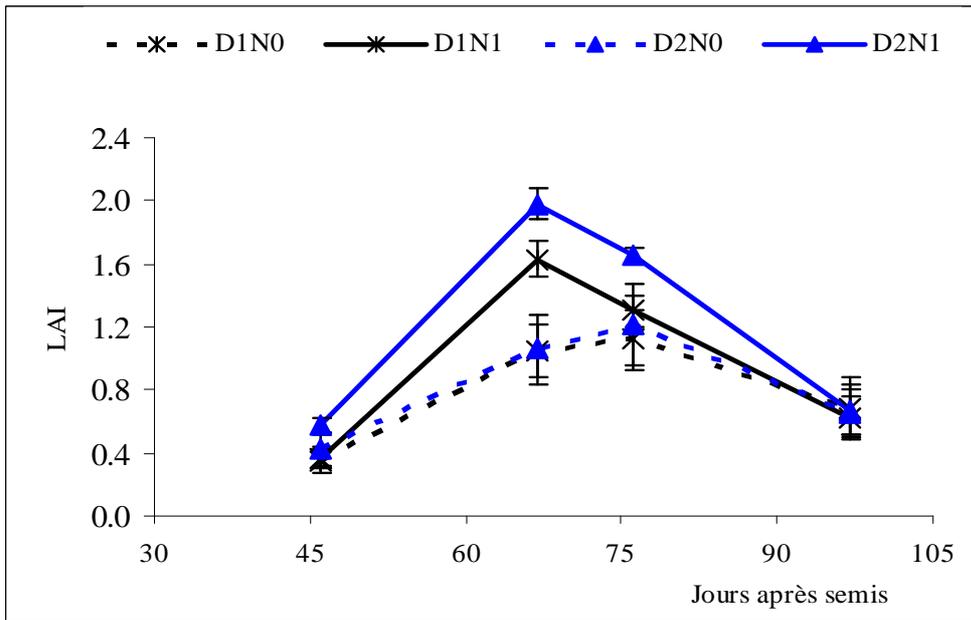


Figure 45 : Evolution du LAI en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée, en conditions hydriques pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants } ha^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants } ha^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg } ha^{-1} \text{ d'urée}$ et $N1 = 100 \text{ kg } ha^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

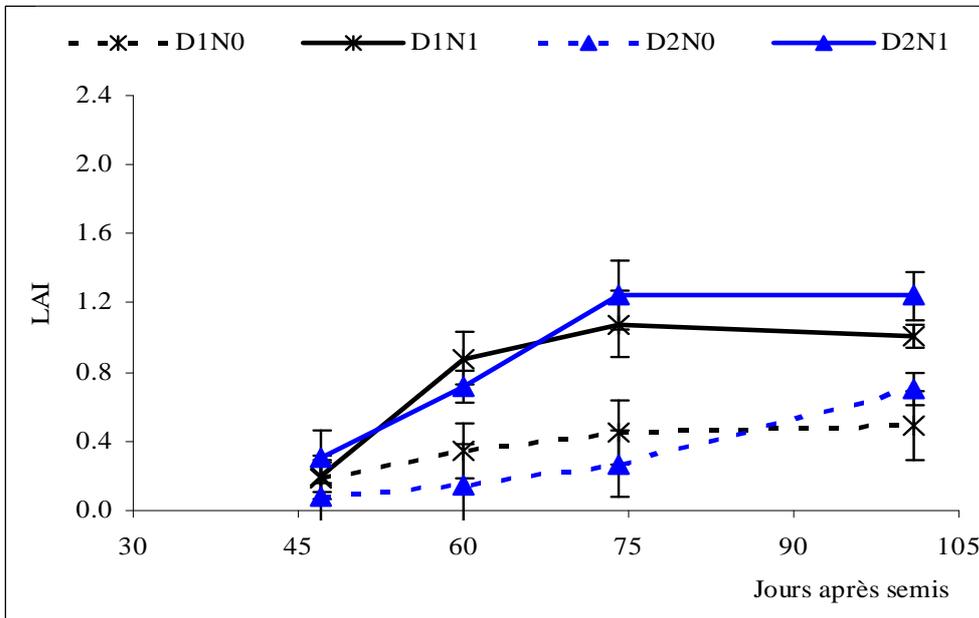


Figure 46 : Evolution du LAI en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée, en conditions hydriques pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants } ha^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants } ha^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg } ha^{-1} \text{ d'urée}$ et $N1 = 100 \text{ kg } ha^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

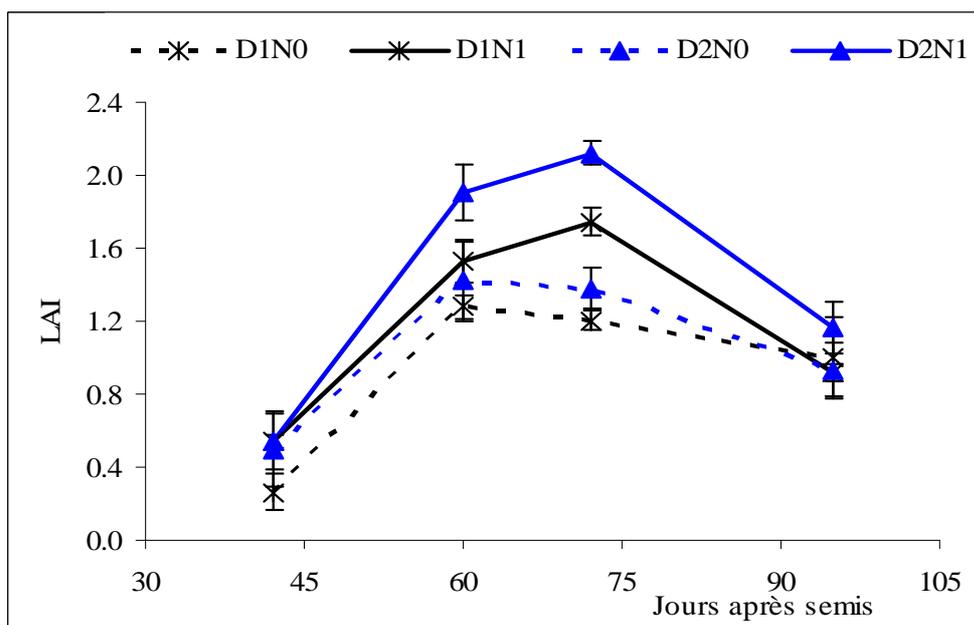


Figure 47 : Evolution du LAI en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée, en conditions d'irrigations complémentaires ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

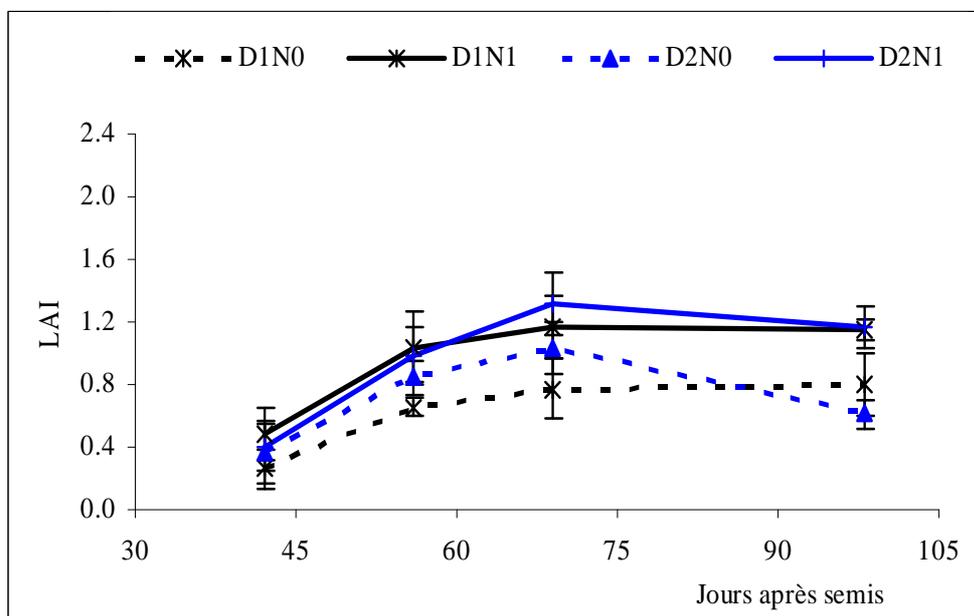


Figure 48 : Evolution du LAI en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée, en conditions d'irrigations complémentaires ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d'urée}$). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

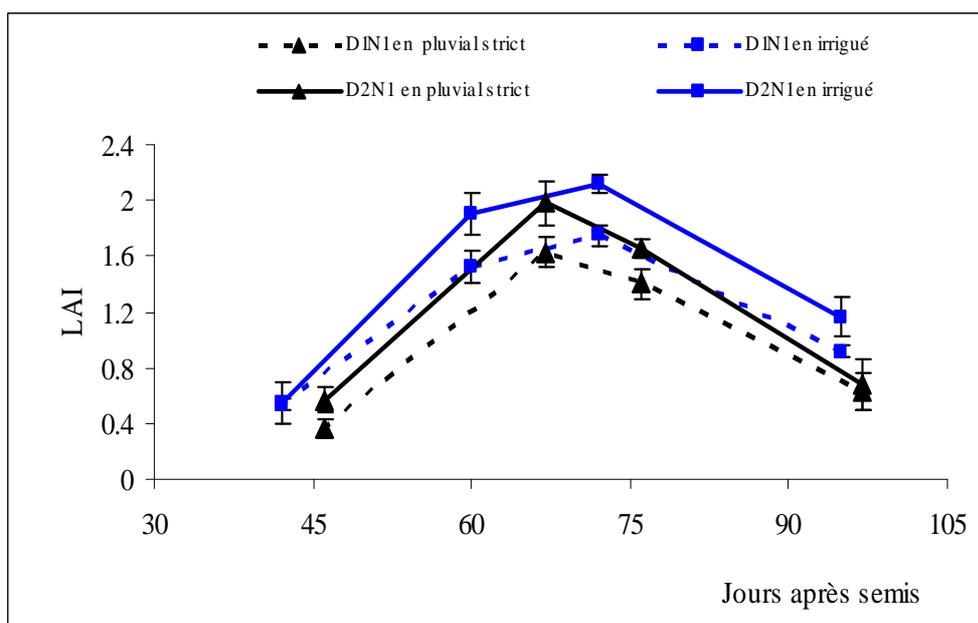


Figure 49 : Evolution comparée du LAI en conditions pluviiales strictes et d'irrigations complémentaires : effet du régime hydrique et de la densité de semis sur le développement des plants fertilisés en urée ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

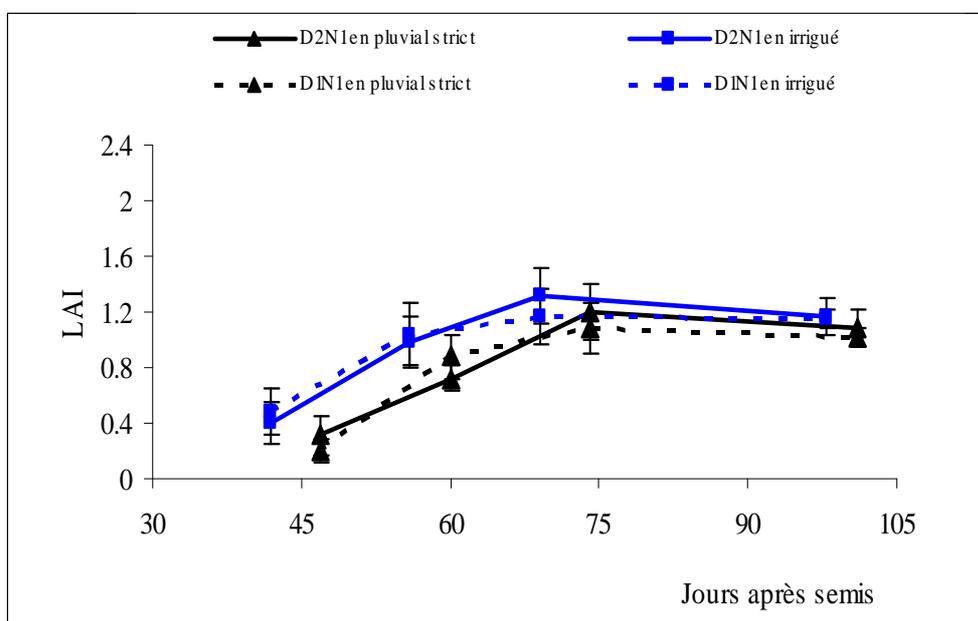


Figure 50 : Evolution comparée du LAI en conditions pluviiales strictes et d'irrigations complémentaires : effet du régime hydrique et de la densité de semis sur le développement des plants fertilisés en urée ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreurs représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

Il ressort de ces résultats que, le LAI de la variété ZATIB a varié aussi bien sous les effets conjugués de l'apport d'urée et de la densité de semis que sous l'impact de l'irrégularité des pluies. En effet, du fait des épisodes secs qui l'ont perturbé et qui ont entraîné la chute brutale du LAI vers le 70^e JAS, le régime pluviométrique de 2002 n'a pas permis le maintien des différences significatives observées entre les traitements d'urée et de densité de semis, jusqu'à la fin du cycle. Le fait que, sous les effets des épisodes secs, la chute du LAI a été plus précoce chez les plants ayant reçu l'urée que chez ceux ne l'ayant pas reçu, montre que la variété a été plus sensible au déficit hydrique en présence d'urée qu'en son absence. Ceci est conforme aux résultats obtenus par Diouf *et al.*, (2004). Tout de même, pendant toutes les deux années d'expérimentation, le LAI a été constamment plus bas sous les traitements non fertilisés. Par ailleurs, les résultats obtenus en 2002 ont montré qu'indépendamment des irrigations complémentaires, la densité de semis a eu un effet significatif sur le LAI, seulement dans les parcelles fertilisées. En effet, jusqu'au 70^e JAS, les conditions hydriques ont été favorables à une augmentation plus importante du LAI dans les parcelles fertilisées des deux densités de semis, que dans celles non fertilisées. Les résultats de 2003 ont été plus affectés par l'effet de la fertilité du sol selon la densité de semis que l'impact d'un stress hydrique épisodique. Cette année, la densité de semis a été sans effet significatif sur l'évolution du LAI, du fait certainement de la baisse de la fertilité initiale du sol. Ceci montre l'importance de l'effet de l'interaction entre l'apport d'urée et la densité de semis sur le développement. De Rouw (2004), avait obtenu des résultats similaires sur le mil dans une autre localité du Niger.

Ces variations du LAI, sous l'impact aussi bien de la fertilité du sol et de la densité de semis que de l'irrégularité de la pluviométrie, traduisent les fluctuations susceptibles d'être observées dans le développement de la biomasse foliaire, donc dans les besoins en eau du mil au cours de son cycle, dans la zone sahélienne. Il est ressorti que l'apport d'urée et l'augmentation de la densité de semis accroissent la sensibilité de la culture aux stress hydriques, surtout lorsque ceux-ci surviennent à un stade de développement avancé. Dans le même sens, Azam-Ali *et al.*, (1984) ont indiqué que la densité de semis influence le tallage et le développement individuel des feuilles, relativement à la fertilité du sol et surtout à l'humidité du sol. Un stress hydrique important entraîne une réduction irréversible du nombre de talles et de feuilles vertes sur les plants dont les besoins en eau seront diminués par rapport à ce qu'ils étaient antérieurement. Selon Ben Salam *et al.*, (1991), en cas de stress, la plante diminue ses besoins hydriques en accélérant notamment le dessèchement de ses feuilles les plus anciennes et de ses talles les plus jeunes. Ceci permet de réduire la charge de la plante aux seuls brins plus développés et susceptibles de fructifier avant l'épuisement de la réserve hydrique du sol. Le nombre de feuilles et de talles qui meurent sous l'effet du stress est

d'autant plus élevé que le développement des plants a été augmenté par l'apport d'urée. Selon Diouf (2000), en situation de stress, le potentiel hydrique de la plante baisse considérablement et conduit à un ralentissement de l'expansion volumique des tissus, puis à une réduction de l'indice foliaire, de la captation du rayonnement, de la photosynthèse globale, et finalement de la production. Toutefois, en diminuant la densité de semis, les plants du mil restent moins sensibles au stress hydrique que lorsqu'ils sont plus nombreux à exploiter la même portion de sol. En cas d'insuffisance hydrique, les fortes densités de semis, associées à la fertilisation azotée, présentent le plus haut risque d'aboutir à une mauvaise production, parce qu'elles augmentent la sensibilité de la culture à la sécheresse.

Les résultats obtenus en conditions d'irrigations complémentaires ont montré que, lorsque la fertilité du sol n'est pas suffisante, la faible densité de semis reste favorable à l'augmentation du LAI, du fait qu'elle retarde la mort des talles et la sénescence des feuilles vers la fin de la saison. Ce qui justifierait le choix des faibles densités de semis pour la zone sahélienne où le développement du LAI du mil est généralement entravé par la variabilité spatio-temporelle de la fertilité du sol et de la ressource en eau, rendant ainsi sans succès l'application des fortes densités de semis. Pandey *et al.*, (2001) ont fait des investigations dans ce sens et ont montré que la réponse de la biomasse végétative à l'azote est très dépendante de la saison et du site de culture. Les fortes densités de semis sont par contre mieux indiquées pour augmenter le couvert foliaire et les rendements de la culture lorsque les conditions hydriques et de fertilité du sol ne sont pas limitantes. En effet, la satisfaction des besoins en eau ne permet d'optimiser le développement du LAI du mil que lorsque le sol est suffisamment riche et vice-versa.

En définitive, les résultats de cette étude permettent de retenir que, l'effet favorable de l'urée au développement du LAI reste étroitement lié, outre les techniques culturales, à la variabilité intra et inter-saisonnière de la pluviométrie et du niveau de la fertilité initiale du sol. Devant ces paramètres dont l'interaction est souvent défavorable sur la croissance du mil, seule la densité de semis pourrait servir de "régulateur", pour permettre à cette culture de mieux réussir dans ces conditions sahéliennes très contrastées. En effet, lorsqu'elle est faible, la densité de semis permet une amélioration du développement foliaire des plants dans des conditions hydriques incertaines ; cela indépendamment du niveau de la fertilité du sol. Et, lorsqu'elle est forte, elle n'est pas favorable au développement des plants sur un sol pauvre, même si l'eau n'est pas un facteur limitant. Cependant, les fortes densités de semis seraient les mieux indiquées pour donner la meilleure couverture foliaire, si toutefois le sol est riche et bien arrosé. Malheureusement, cette condition est difficile à satisfaire dans le milieu sahélien où les stress hydriques peuvent survenir à tout moment de la saison. Ceci permet de réitérer que le vœu d'accroître la production des cultures par l'augmentation de la fertilité des sols et

de la densité de semis demeure une hypothèse peu prometteuse et même à grand risque pour l'obtention d'une bonne production, tant que l'eau demeure un facteur limitant.

10.3. Hauteur des plants

10.3.1. Effet de la date de semis

Les mesures de la hauteur des plants ont été faites en même temps que les observations pour l'évaluation de la matière sèche accumulée. En 2002, la hauteur des plants de la variété HKP n'a pas significativement varié en fonction de la date de semis, à toutes les dates d'observation (figure 51). Par contre, chez la variété ZATIB, la différence a été significative au 60^e JAS. Il en est de même pour la variété MTDO au 46^e JAS et au 60^e JAS. La figure 51 montre qu'en 2002, la croissance en hauteur des plants de toutes les variétés a été plus accélérée, avec le semis tardif qu'avec celui précoce jusqu'au 77^e JAS. Quant à la différence inter variétale, elle a été observée entre la variété tardive (MTDO) et celles plus précoces (HKP et ZATIB), particulièrement du 60^e au 77^e JAS. En effet, les plants de cette variété tardive, ayant eu la plus petite taille de la levée au 77^e JAS, ont été les plus hauts à la maturité (pour environ 20 jours de retard de cycle, par rapport aux variétés HKP et ZATIB). En 2002, seule la MTDO a réduit la taille de ses plants avec le retard de semis (figure 51). Par contre, en 2003 toutes les trois variétés ont significativement réduit la taille de leurs plants avec le semis tardif (figure 52). En 2003, il n'y a pas eu de différences significatives entre les variétés.

Ces résultats ont montré que la hauteur des plants n'a pas significativement varié en fonction de la date du semis, chez les variétés HKP et ZATIB en 2002. Ceci peut s'expliquer par la particularité de la saison 2002 qui a été caractérisée, non seulement par des épisodes secs de mi-parcours ayant plus affectés les plants du semis précoce, mais aussi par des pluies tardives (jusqu'en mi-octobre) ayant permis aux plants du semis tardif de poursuivre leur cycle dans de bonnes conditions hydriques. Quant à la saison 2003, elle a précocement pris fin à partir du 19 septembre. Ceci donne l'impression que la croissance de ces variétés dépend, outre le temps perdu avant les semis tardifs, de la longueur de la saison après le semis ; c'est-à-dire de la durée de prévalence des facteurs climatiques favorables ou non à la prolongation de la pluviosité après le semis. La capacité des plants à réduire leurs tailles avec le retard du semis, serait ainsi un caractère adaptatif qui permet aux variétés photosensibles de mil de réguler leur croissance, en relation avec les inductions climatiques annonçant la fin précoce ou tardive de la saison des pluies. En effet, ces variétés ont la capacité de conditionner et d'harmoniser leur métabolisme de croissance avec les variations de la longueur du jour, pour réduire leurs potentialités de développement devant la nécessité d'assurer leur reproduction avant la fin de la saison.

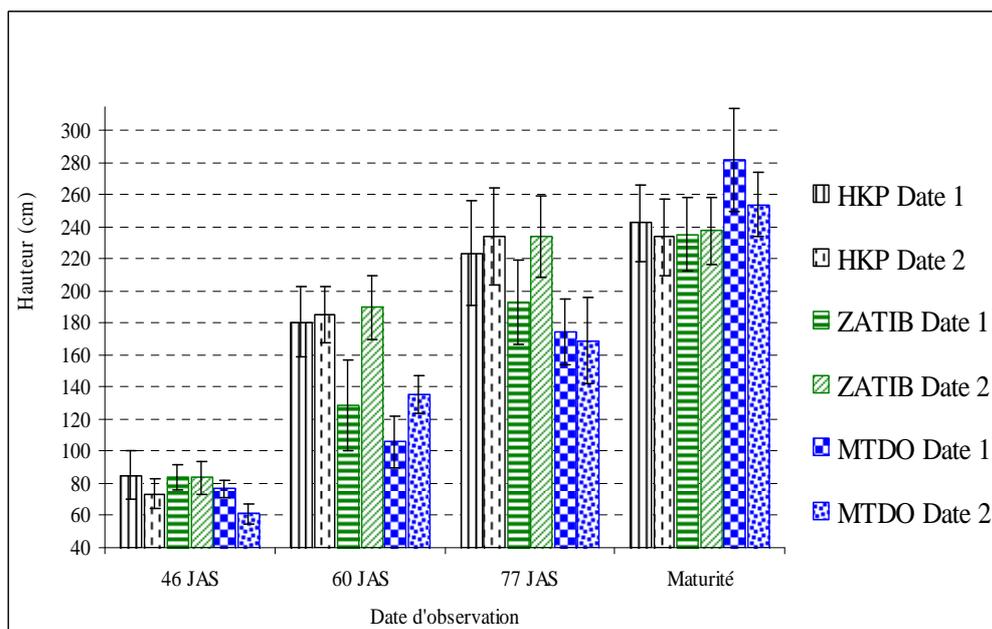


Figure 51 : Hauteur des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet*). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

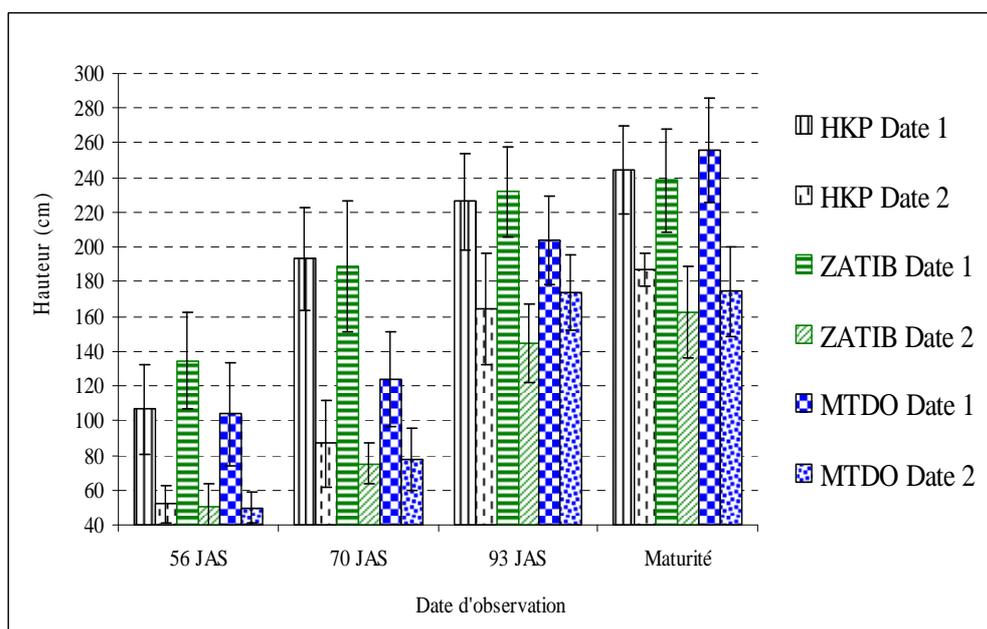


Figure 52 : Hauteur des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet*). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

10.3.2. Effet de l'apport d'urée

L'effet de l'urée a été non significatif sur la croissance en hauteur des trois variétés en 2002 (figure 53), mais très significatif en 2003, particulièrement chez la ZATIB (du 45^e JAS à la maturité) et chez la MTDO (au 80^e JAS) (figure 54). En effet, en 2002, l'apport d'urée n'a pas permis aux plants des différentes variétés de croître plus en hauteur par rapport au traitement témoin. Chez la HKP, la taille des plants a d'ailleurs été plus grande dans les parcelles non fertilisées que dans celles fertilisées, jusqu'au 72^e JAS, c'est-à-dire à l'épiaison (figure 53). Concernant le comportement variétal, les variétés HKP et ZATIB ont présenté en 2002, presque les mêmes hauteurs maximales à la maturité, aussi bien avec le traitement N0 qu'avec celui N1 d'urée. En effet, sous l'effet de la même dose d'urée (N1), les plants de ces variétés ont atteint des hauteurs maximales de l'ordre de 235 à 239 cm à partir du 72^e JAS en 2002, contre une taille maximale de 240 cm atteinte plus tardivement au 80^e JAS par les deux variétés en 2003. Dans les parcelles non fertilisées, la croissance a été limitée à seulement 225 cm pour la HKP et à 196 cm pour la ZATIB en 2003 (figure 54).

La variété MTDO a eu une hauteur beaucoup plus grande que celles observées chez HKP et ZATIB, au cours des deux années. Ses plants ont atteint 273 cm de haut en 2002 et jusqu'à 292 cm en 2003, sous l'effet de l'urée, contre 252 cm et 271 cm, respectivement pour les deux années, en l'absence d'urée (figures 53 et 54). Ceci montre qu'en 2002, la croissance de cette variété tardive a été diminuée d'à peu près 30 cm par rapport à la taille qu'elle a eu en 2003, pour chaque traitement d'urée.

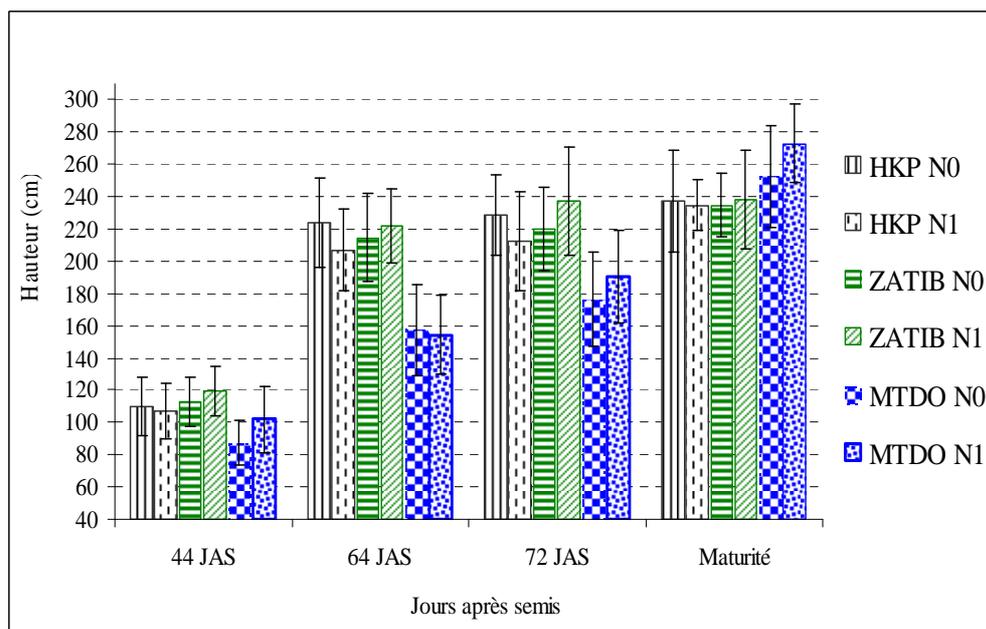


Figure 53 : Hauteur des plants des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

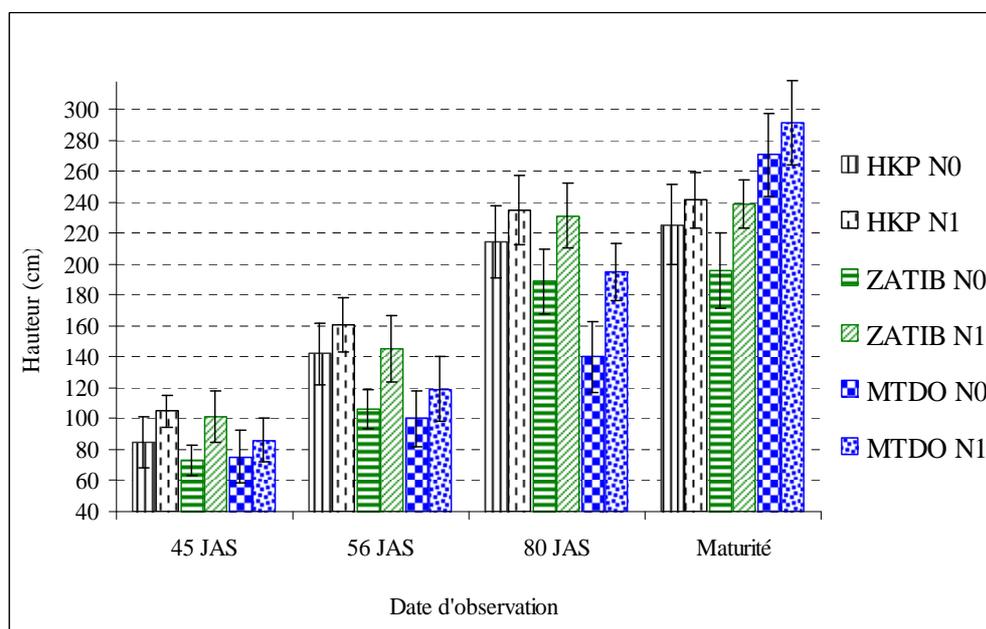


Figure 54 : Hauteur des plants des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

Il ressort de ces résultats que l'effet de l'urée a été moindre sur la croissance en hauteur des trois variétés en 2002. En plus, cette année, les plants de la variété HKP ont été plus grande dans les parcelles non fertilisées que dans celles fertilisées. Ceci s'expliquerait par la mauvaise répartition de la pluviométrie 2002, qui a plus affecté la croissance en hauteur des plants fertilisés de toutes les trois variétés. En 2003, la croissance en hauteur a été significativement diminuée dans les parcelles non fertilisées. Ceci est dû à la diminution de la fertilité initiale du sol par rapport à 2002. Il est à noter qu'en dehors de la différence variétale et de l'effet de la fertilité du sol, la disponibilité hydrique intervient aussi dans la variabilité de la croissance du mil. En effet, le ralentissement ou l'arrêt de la croissance provoqué par un stress hydrique a généralement été plus sévère chez les plants fertilisés que chez ceux non fertilisés, à cause de leurs besoins hydriques rendus plus importants par l'urée.

Dans cette situation, il serait donc difficile de déterminer les potentialités de croissance des variétés du mil au Sahel où, hormis le facteur hydrique, la croissance du mil est aussi dépendante de la nature chimique et physique du sol, sans tenir compte de la prévalence des autres facteurs climatiques comme l'insolation et la température (McIntyre *et al.*, 1993). En effet, lorsqu'un stress hydrique important est perçu pendant les phases intermédiaires de la croissance, il stimulerait la plante à dérouter rapidement sa morphogenèse vers l'épiaison au détriment de la croissance en hauteur, pour chercher à reproduire avant l'installation d'un autre déficit hydrique. Le semis de cet essai étant fait le 15 juillet en 2002 et 28 jours plus tôt en 2003 (17 juin), la date de semis aurait aussi un impact sur la variation selon l'année d'expérimentation. En effet, il a été constaté que la croissance des plants a été plus accélérée en 2002 qu'en 2003, surtout chez les variétés HKP et ZATIB. Ceci, du fait que le semis du 15 juillet 2002 aurait permis aux jeunes pousses de ces variétés de bénéficier de la disponibilité en eau et des températures modérées caractérisant le mois d'août au Sahel (Amadou, 1994), pour accélérer leur croissance en hauteur.

10.3.3. Effet de la densité de semis et de l'apport d'urée, en conditions hydriques pluviales strictes et d'irrigations complémentaires

L'effet de l'interaction entre la densité de semis et l'apport d'urée a été testé uniquement sur la variété de mil ZATIB, aussi bien en conditions hydriques pluviales strictes qu'en situation d'irrigations complémentaires. Les résultats obtenus montrent que la hauteur des plants de cette variété a été inférieure à 250 cm au cours des deux années et dans toutes les situations de disponibilité en eau (figures 55 à 58). Toutefois, ces figures montrent une large variabilité interannuelle de la hauteur des plants, selon les dates d'observations et les traitements (de densité de semis et d'apport d'urée). En 2002, la croissance a été progressive et uniforme, de la levée jusqu'au 70^e JAS. A partir de cette date, elle a été ralentie au niveau de tous les traitements. Cependant, cette année, les traitements de densité de semis et d'apport d'urée

n'ont pas eu d'effets significatifs sur la croissance en hauteur, de la première observation à la maturité (figure 55). A la maturité, on note une légère supériorité de la taille des plants non fertilisés (taille maximale de 210 cm), par rapport à celle des plants fertilisés (taille maximale de 190 cm). Par contre, en 2003, ce sont les plants ayant reçu de l'urée qui ont eu les hauteurs les plus élevées : 235 cm pour le traitement fertilisé de la faible densité de semis (figure 56). Cette année (2003), l'apport d'urée a eu un effet très significatif sur la croissance en hauteur des plants, du 60^e JAS à la maturité. Il en est de même pour la densité, entre le 60^e et le 74^e JAS.

Les apports complémentaires d'eau ont, non seulement atténué la variabilité saisonnière de la croissance en hauteur, mais aussi amélioré la taille des plants fertilisés et non fertilisés, par rapport aux conditions pluviales strictes (figures 55 à 58). En plus, les figures 55 et 57 montrent qu'à la maturité, la hauteur des plants a été plus uniforme en situation d'irrigations complémentaires (hauteur maximale de 240 cm pour les plants de tous les traitements) qu'en conditions hydriques pluviales strictes. Ainsi, comparativement aux conditions pluviales strictes, les irrigations complémentaires ont permis d'augmenter la taille des plants fertilisés de plus de 40 cm. Cependant, la même figure 57 montre que cette taille a été atteinte par les plants fertilisés de la faible densité de semis, environ 15 jours avant les autres plants. En 2003, la figure 58 montre qu'il y a eu une légère baisse de la croissance au niveau des parcelles non fertilisées de la forte densité de semis, par rapport à celles fertilisées de la faible densité de semis. Dans cette composante irriguée, l'apport d'urée a eu un effet significatif sur la croissance en hauteur, seulement dans les parcelles à faible densité de semis (D1N0 et D1N1), entre le 56^e et 69^e JAS.

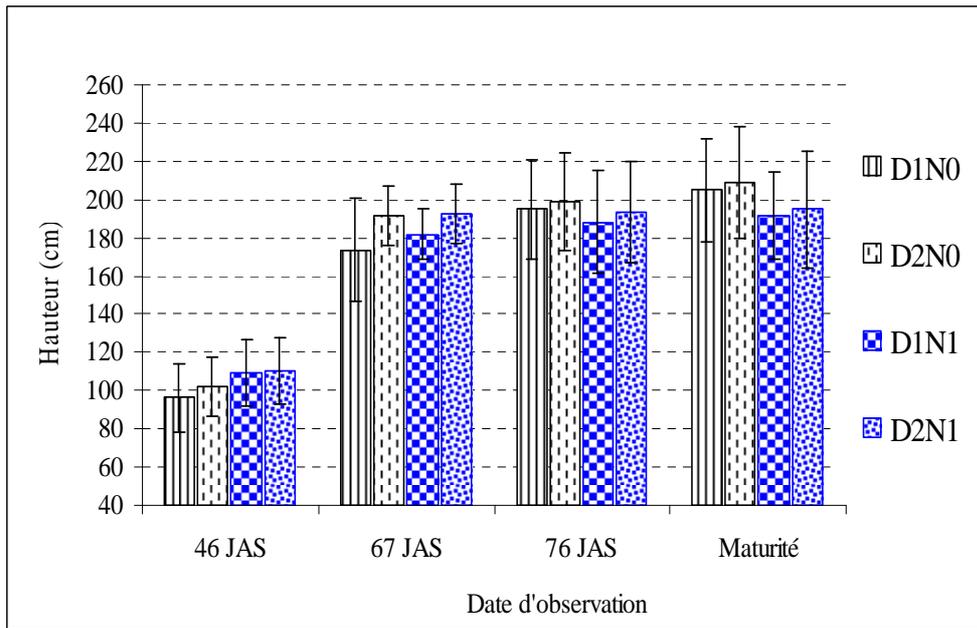


Figure 55 : Hauteur des plants de la variété de mil ZATIB en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée en conditions pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

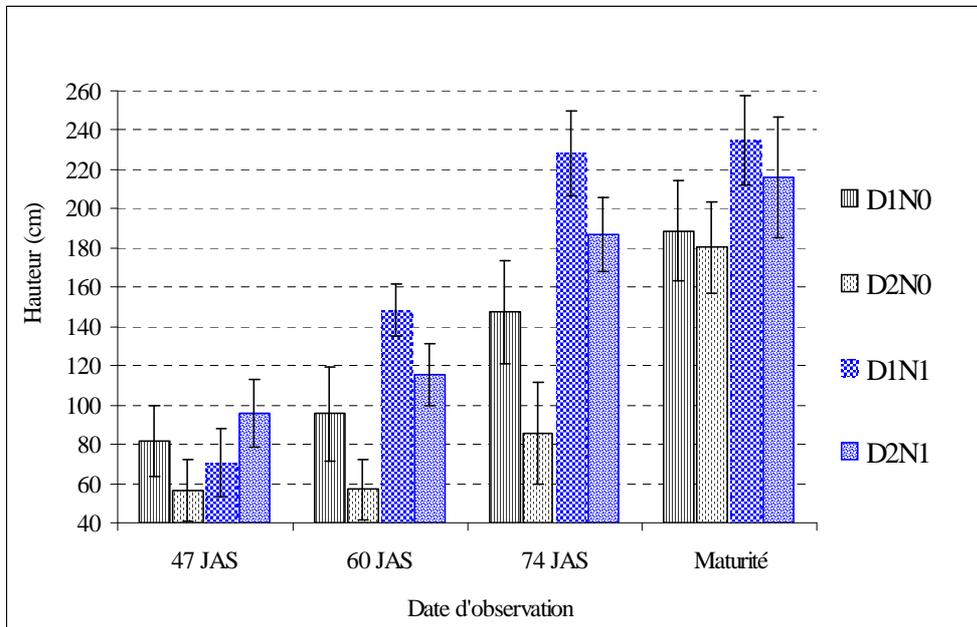


Figure 56 : Hauteur des plants de la variété de mil ZATIB en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée en conditions pluviales strictes ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

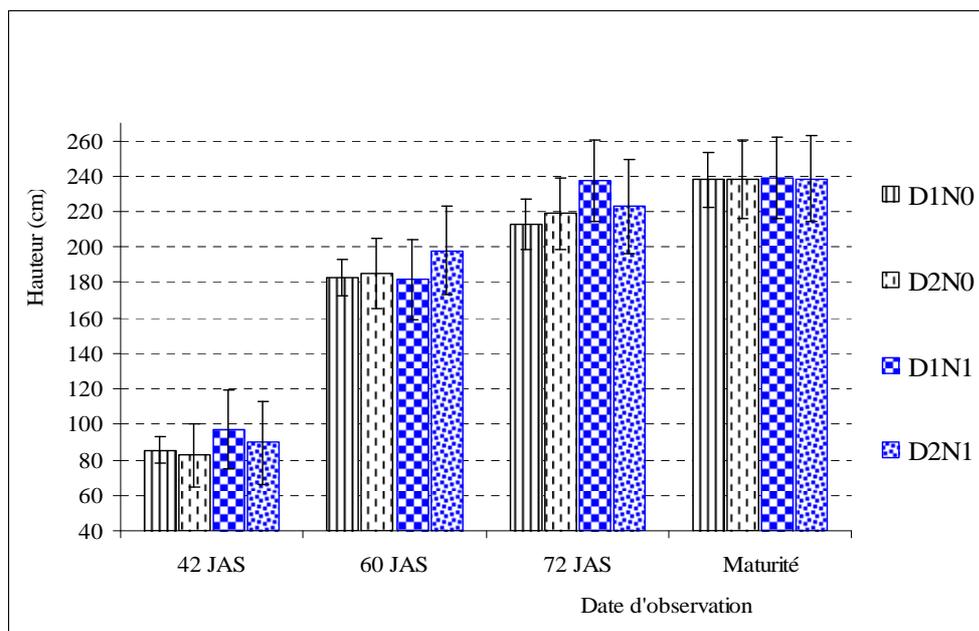


Figure 57 : Hauteur des plants de la variété de mil ZATIB en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée en conditions d'irrigations complémentaires ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

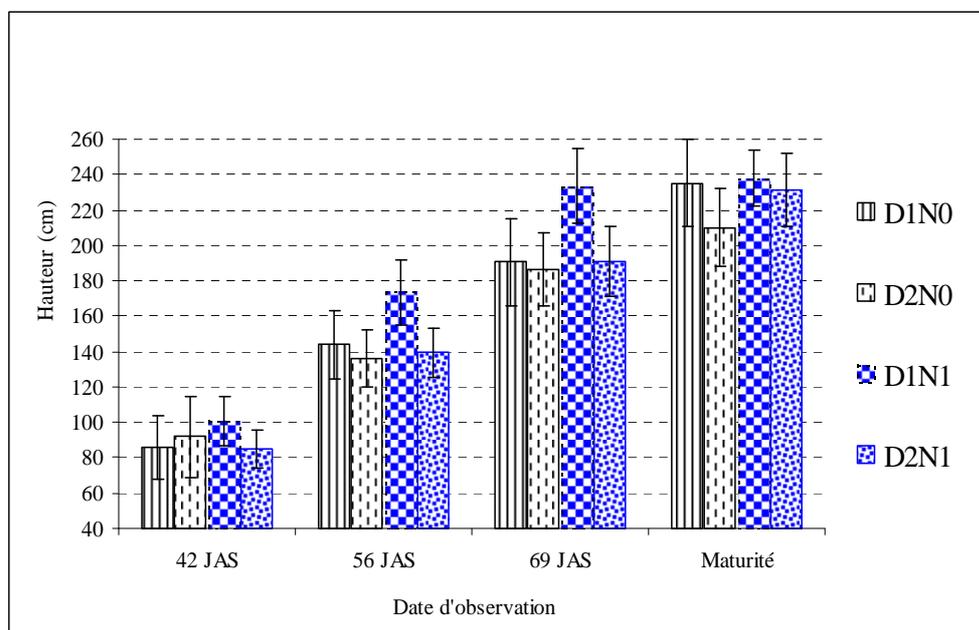


Figure 58 : Hauteur des plants de la variété de mil ZATIB en fonction de la densité de semis et de l'apport d'urée en conditions d'irrigations complémentaires ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$, $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$, $N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

Ces résultats montrent qu'en 2002, en conditions pluviales strictes les plants fertilisés ont été les plus touchés par le ralentissement de la croissance, pour un même traitement de densité de semis. Ceci est contraire à ce qui est attendu de l'apport d'urée dont l'effet devait plutôt entraîner une augmentation de la hauteur des plants. Ce résultat traduit l'impact des épisodes secs observés en 2002. En effet, Diouf *et al.*, (2004) ont indiqué que l'apport de fertilisants, notamment de l'urée, provoque une augmentation des besoins en eau de la plante à cause du développement exubérant qu'il favorise. L'épisode sec de septembre 2002 aurait donc eu un impact négatif sur les plants fertilisés dont la sensibilité au stress hydrique aurait été augmentée par l'urée. La sécheresse influence tous les aspects physiologiques de la plante et le moindre déficit en eau entraîne la sénescence des feuilles (Maracchi *et al.*, 1992) et le ralentissement de la croissance (Cantini, 1995). Ceci se confirme à travers les résultats de 2003, qui ont montré que les plants ayant reçu de l'urée ont eu les hauteurs les plus élevées, car n'ayant pas subi d'épisodes secs cette année. En 2003, les plants non fertilisés ont eu une croissance assez ralentie surtout au niveau des parcelles de forte densité de semis.

Les irrigations complémentaires ont atténué la variabilité saisonnière de la croissance en hauteur, en améliorant la taille des plants fertilisés, par rapport aux conditions pluviales strictes. Toutefois, en 2003, les plants de cette composante irriguée de l'essai ont été également touchés par l'insuffisance de la dose d'urée apportée, suite à la baisse de la fertilité initiale du sol. Ceci montre que la disponibilité en eau n'empêche pas au mil d'avoir une croissance ralentie tant que le sol est pauvre. Ce ralentissement est encore plus marqué lorsque la densité de semis est forte. Dans des conditions hydriques limitantes, les faibles densités de semis permettent au mil de mieux croître en hauteur que les fortes. L'effet de la densité de semis sur la hauteur des plants est alors lié à la fertilité du sol et à la disponibilité en eau. Sur les sols pauvres, elle n'est favorable à la croissance en hauteur que lorsqu'elle est faible ; lorsqu'elle devient forte, elle exige une amélioration de la fertilité du sol et de la disponibilité en eau.

10.3.4. Relation entre hauteur des plants et LAI

La figure 59 montre qu'il existe une relation linéaire entre la hauteur et l'indice de surface foliaire (LAI) du mil. Cette relation a été établie à partir des données recueillies sur trois différents essais dans lesquels les variétés HKP, ZATIB et MTDO ont été testées vis-à-vis des effets de l'apport d'urée, de la densité et date de semis, pendant deux ans. Les résultats obtenus montrent que la relation n'est pas liée aux pratiques culturales ; cela du fait que ce sont les mêmes conditions de culture régissant la croissance en hauteur, qui déterminent aussi le développement du LAI. Elle est cependant liée à la variété. En effet, la régression entre les deux paramètres étudiés a permis de définir deux équations linéaires différentes selon la durée du cycle variétal (figure 59). Cette figure montre que les variétés HKP (90 jours) et ZATIB

(105 jours) présentent des comportements similaires, du fait que la régression faite à partir de leurs données regroupées a donné un coefficient de corrélation R^2 égal à 0,75 entre le LAI et la hauteur des plants. La variété MTDO (120 jours) a, quant à elle, été différente des deux autres. En effet, la régression ($R^2 = 0,83$) obtenue entre la hauteur et le LAI des plants de cette variété, montre que cette variété favorise plus le développement de LAI, que la HKP et la ZATIB qui, au contraire tendent plus à croître en hauteur qu'elles ne développent le LAI. Cependant, la relation a été établie seulement pour la phase végétative allant de la levée à l'épiaison, au moment où la croissance des feuilles permet une augmentation simultanée du LAI et de la taille des plants. L'importance de cette relation serait de faciliter l'estimation du LAI de la culture à partir de la hauteur des plants, selon la variété. Cependant, elle serait peu fiable en cas de stress hydrique et d'attaque parasitaire, créant une disproportion entre le LAI et la hauteur des plants, suite aux pertes massives de feuilles qu'ils provoquent.

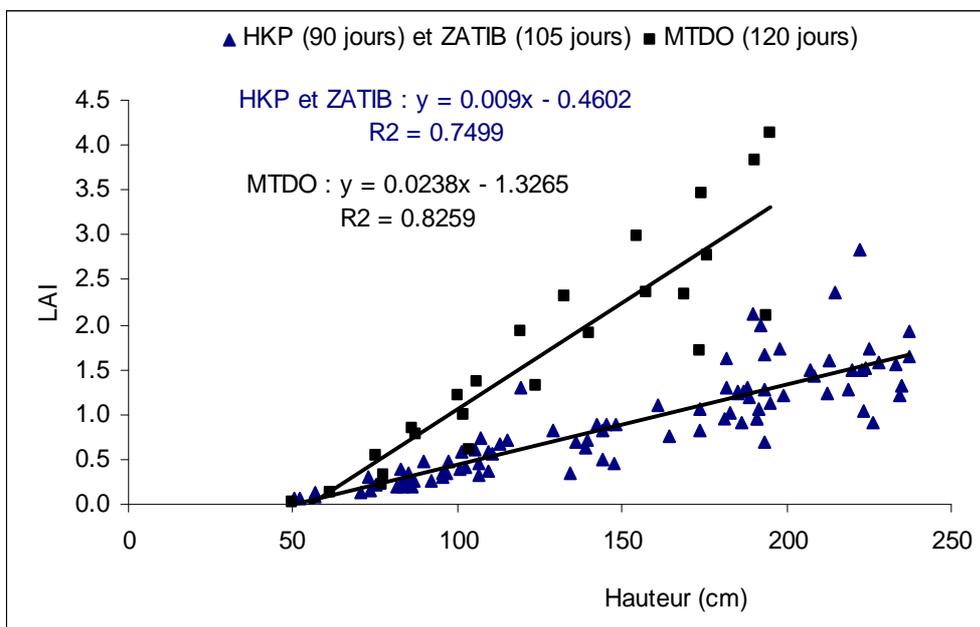


Figure 59 : Relation entre la hauteur des plants et le développement du LAI de trois variétés de mil : HKP, ZATIB et MTDO. Agrhymet, 2002 et 2003.

10.4. Effet de la date de semis sur la phénologie des 3 variétés de mil

Le suivi phénologique ou étude des rapports entre les phénomènes périodiques de la vie de la plante et les conditions agroclimatiques qui les régissent, a consisté à noter, dans leurs manifestations les plus apparentes, les différentes phases dont la succession définit le rythme du développement de la culture. Pour mieux comprendre les mécanismes d'adaptation de la plante aux variations des facteurs agroclimatiques, l'apparition et la mort des feuilles ont ainsi été suivies en 2002 et 2003, sur les trois variétés testées, par rapport à l'effet de la date de semis. Cependant, seules les données de 2002 ont été traitées, celles de 2003 ayant été inexploitable.

10.4.1. Fréquence de l'apparition et de la mort des feuilles

La fréquence d'apparition des feuilles a varié selon les variétés étudiées et pour une même variété selon la date de semis. Les plants du semis tardif ont présenté la fréquence la plus élevée (figure 60A). En effet, l'apparition des feuilles a été plus accélérée chez la HKP, aussi bien avec le semis précoce qu'avec celui tardif. Cette variété a émis ses feuilles à raison de 0,27 feuilles jour⁻¹ pour le semis précoce et 0,32 feuilles jour⁻¹ pour le tardif, de la levée à la montaison. Ainsi, pour un décalage de 28 jours entre les deux dates de semis, les brins maîtres des plants précocement semés de la variété HKP étaient à leur 8^e feuille ligulée au 39^e JAS, pendant que ceux du semis tardif étaient à la 11^e feuille ligulée au 35^e JAS (figure 60A). A la montaison, le nombre de feuilles ligulées était de 14 pour le semis précoce au 54^e JAS et de 11 pour le semis tardif au 35^e JAS. Cependant, le nombre total de feuilles développées, de la levée à la maturité, par les brins maîtres du 2^e semis de cette variété, a été nettement inférieur à celui du 1^{er} semis (17 feuilles pour le semis tardif et 22 pour le précoce). En début épiaison, le nombre de feuilles vivantes sur un brin maître de la variété HKP était de 11 feuilles pour le 1^{er} semis, contre 8 feuilles pour le 2^e. Ce qui dénote également une importante variabilité du nombre des feuilles émises avec le décalage de la date de semis (tableau XI).

La variété ZATIB, a eu le même comportement que la HKP, en développant 13 feuilles ligulées au 54^e jour après le 1^{er} semis, contre 11 feuilles au 38^e jour après le 2^e semis (figure 60A). Durant le cycle, le 1^{er} semis de la ZATIB a émis 22 feuilles ligulées par brin maître dont 11 vivantes à l'épiaison, contre 17 feuilles ligulées dont 8 vivantes à l'épiaison pour le 2^e semis. Cependant, pour la même date de semis tardif, les plants de la ZATIB ont entamé la phase de la montaison 3 jours après ceux de la HKP, en dépit du fait que les deux variétés aient émis le même nombre de feuilles pendant le tallage.

Quant à la MTDO, elle a continué à émettre des feuilles bien après l'épiaison de la HKP et de la ZATIB et, cela jusqu'au 93^e jour après le 1^{er} semis et au 78^e jour après le 2^e semis (figure 60A). A la montaison (66^e JAS pour le 1^{er} semis et 48^e JAS pour le 2^e), les brins maîtres du 1^{er}

semis de la MTDO ont émis jusqu'à 18 feuilles ligulées, contre 15 feuilles pour ceux du 2^e semis. Le nombre de feuilles émises pendant la montaison par les brins maîtres des plants des deux semis a été de 12 pour la 1^{ère} date et de 10 pour la 2^e date ; ce qui donne un total de feuilles ligulées émises de 30 pour le 1^{er} semis dont 13 vivantes par brin et de 25 pour le 2^e semis dont 11 vivantes par brin, à l'épiaison.

Le nombre important de feuilles qu'émet la MTDO, avec la même fréquence d'apparition que chez la HKP et la ZATIB, explique le caractère tardif de son cycle de développement. En effet, au niveau du 1^{er} semis, cette variété à cycle tardif a émis sa dernière feuille 20 jours plus tard que la HKP et le ZATIB, après avoir développé 8 feuilles de plus que celles-ci. Cependant, au niveau du 2^e semis, elle a émis sa dernière feuille 13 jours après la ZATIB et 22 jours après la HKP, pour avoir également 8 feuilles de plus que chacune de ces deux variétés à cycles plus courts (tableau XI). En outre, bien qu'au niveau du semis tardif, la ZATIB et la HKP aient eu le même nombre de feuilles ligulées par brin maître (17) à l'épiaison, la ZATIB a épié 9 jours plus tard que la HKP. Par contre, avec le semis précoce, les deux variétés ont eu la même durée de croissance végétative (71 JAS). Ceci montre que la HKP et la MTDO ont plus raccourci leurs cycles avec le retard du semis que la ZATIB. Par ailleurs, le nombre de feuilles émises par les brins maîtres de toutes les variétés a été réduit de 5 feuilles avec le semis tardif (tableau XI).

Quant à la sénescence foliaire, elle se faisait presque à la même fréquence chez toutes les variétés. Cependant, elle a varié avec la date de semis pendant la montaison et l'épiaison (figure 60B). En effet, en dépit du décalage de 28 jours entre les 2 dates de semis, les brins maîtres des plants du 1^{er} et 2^e semis des différentes variétés, perdaient leurs feuilles avec la même fréquence, jusqu'au 39^e jour après chaque semis. Après cette date, la mort des feuilles se faisait à une fréquence plus élevée chez les plants du 2^e semis de toutes les 3 variétés.

Il ressort de ces résultats, similaires à ceux obtenus par Amadou (1994), que le nombre de feuilles pouvant être émises par un plant de mil pendant chaque phase phénologique ou durant le cycle, dépend non seulement de la variété, mais aussi de la date de semis. Le fait que la variété à cycle long a émis plus de feuilles que celles à cycle plus court s'explique par le changement de la durée du jour au cours du cycle qui joue un rôle très important dans le développement des variétés photosensibles de mil (Vaksmann *et al.*, 1996 ; Mohsen *et al.*, 1999 ; Traoré *et al.*, 2000a ; Traoré, 2001). Par ailleurs, il a été observé que la sénescence foliaire est plus accélérée chez les plants du semis tardif que chez ceux du semis précoce. Ceci est dû, non seulement aux conditions de température et du stress hydrique ayant plus affecté les plants du semis tardif en 2002, mais aussi à la longévité des feuilles qui est plus courte avec le retard du semis.

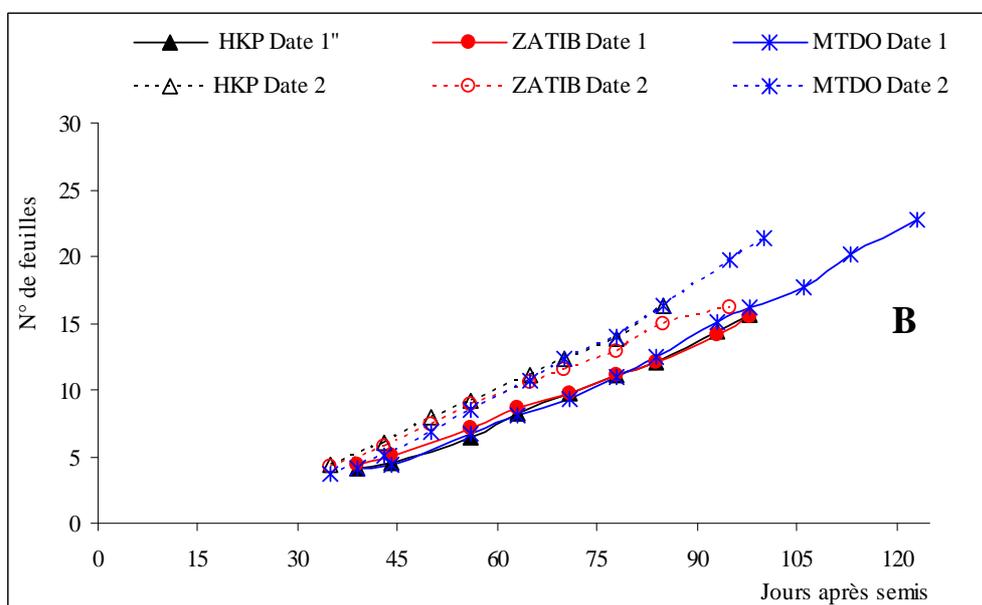
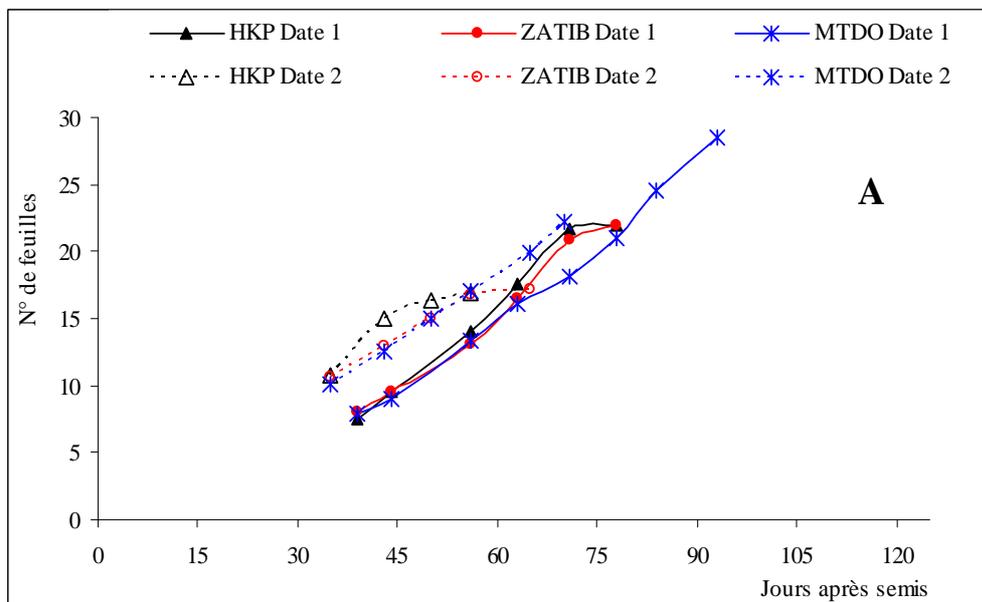


Figure 60 : Fréquence d'apparition des jeunes feuilles ligulées (A) et de mort de celles plus âgées (B) chez les variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis (*Date 1 = 24 juin et Date 2 = 22 juillet*). Agrhymet, 2002.

Tableau XI : Apparition des feuilles chez les variétés de mil HKP, ZATIB, et MTDO en fonction de la date de semis. Agrhymet, 2002.

Semis	Variétés	Date d'app. dernière feuille (JAS)	Nbre de feuilles émises par brin maître
1^{er} semis (24/06/2002)	HKP	71	22
	ZATIB	71	22
	MTDO	93	30
2^e semis (22/07/2002)	HKP	56	17
	ZATIB	65	17
	MTDO	78	25

10.4.2. Épiaison, floraison et maturation des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO

Les résultats du suivi ont montré que l'épiaison a été dépendante de la variété et de la date de semis. En effet, lorsque les plants du 1^{er} semis de la HKP et de la ZATIB avaient épié à 60 %, seulement 20 % de ceux de la MTDO portaient des épis. En 2002, l'épiaison a été peu étalée dans le temps chez les plants du 1^{er} et 2^e semis des variétés HKP et ZATIB qui ont presque tous épié au 75^e JAS (figures 61 et 62). Par contre, en 2003 le taux d'épiaison n'était que de 20 à 30 % au 75^e JAS pour les mêmes variétés. Jusqu'au 100^e JAS, aucune d'elles n'avait épié à 100 %. L'épiaison a été plus retardée chez les plants des deux semis de la MTDO et ceux du 2^e semis de la ZATIB qui, jusqu'à la récolte, ne portaient des épis qu'à 70 % de leur effectif dans les parcelles. En plus, les épis produits ont avorté pour la plupart, du fait qu'en 2003 les pluies s'étaient arrêtées très tôt le 79^e jour après le 1^{er} semis, soit le 57^e jour après le 2^e semis. Cet arrêt précoce des pluies a provoqué un déficit hydrique qui a plus ralenti l'épiaison des variétés tardive et semi-tardive dont les plants étaient encore en montaison. La durée de la phase végétative a été réduite avec le retard de semis chez toutes les variétés, mais cela à un degré moindre en 2003, du fait de l'effet du déficit hydrique vécu vers la fin de cycle (figures 61 et 62).

La floraison et la maturité complète, également affectées par le déficit hydrique, ont varié de la même manière que l'épiaison, selon la variété, la date de semis et la saison (figures 63 à 66). En l'absence de stress hydrique, la floraison était souvent atteinte vers le 8^e jour après l'épiaison, et la maturité complète vers le 20^e jour après la floraison. En cas de déficit hydrique pendant et après l'épiaison, le taux d'avortement des épis devient élevé suite à la mort prématurée des plants. En effet, le stress hydrique affecte négativement le remplissage des grains dont il réduit la taille et le poids. En 2003, pour toutes les variétés et dates de semis, la proportion des plants dont les épis ont atteint la maturité complète a été faible par rapport à celle de 2002 (figures 65 et 66). Les plants du 2^e semis de la MTDO ont été les plus nombreux (80 %) à ne pas atteindre la maturité complète en 2003. Ceci permet de déconseiller un semis tardif de cette variété dans les conditions climatiques de notre site.

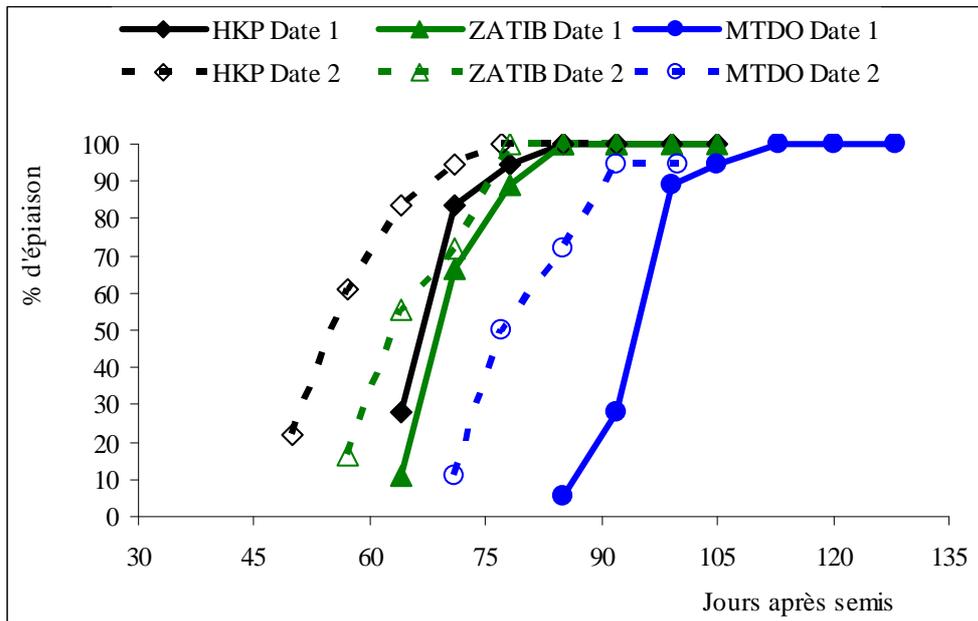


Figure 61 : Suivi de l'épiaison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 24 juin et Date2 = 22 juillet*). Agrhymet, 2002.

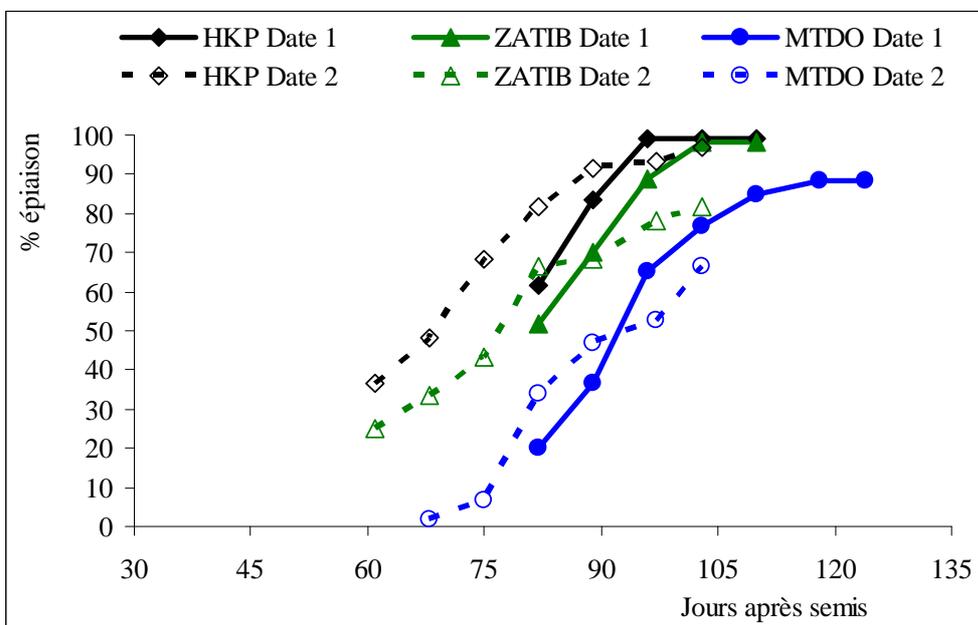


Figure 62 : Suivi de l'épiaison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet*). Agrhymet, 2003.

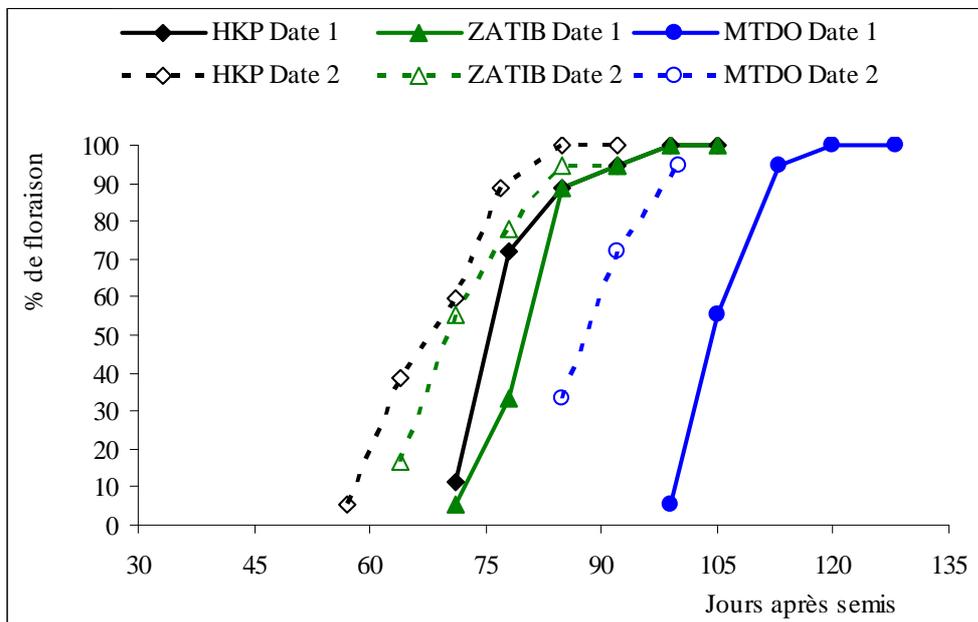


Figure 63 : Suivi de la floraison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 24 juin et Date2 = 22 juillet*). Agrhymet, 2002.

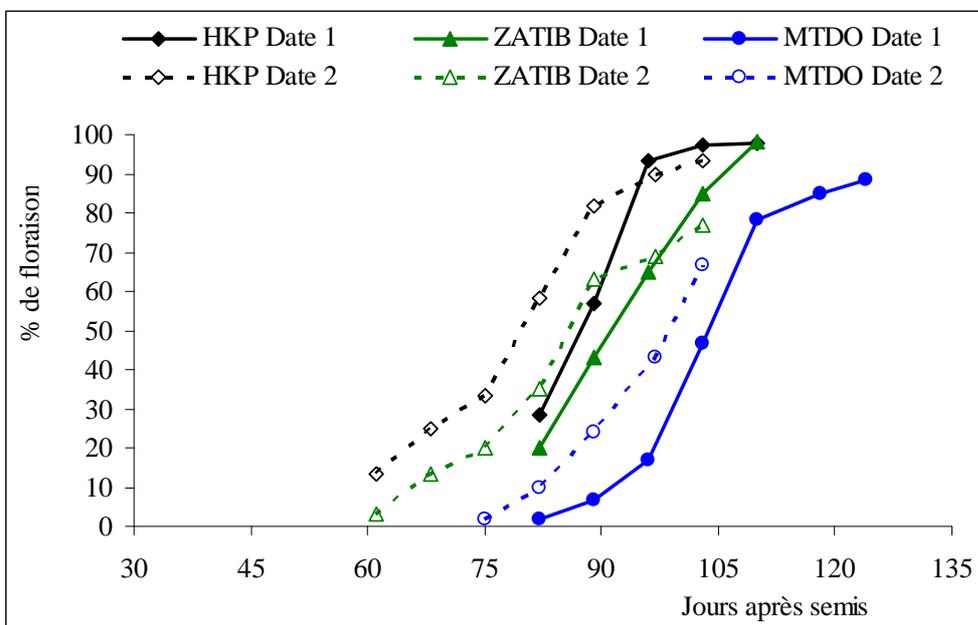


Figure 64 : Suivi de la floraison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet*). Agrhymet, 2003.

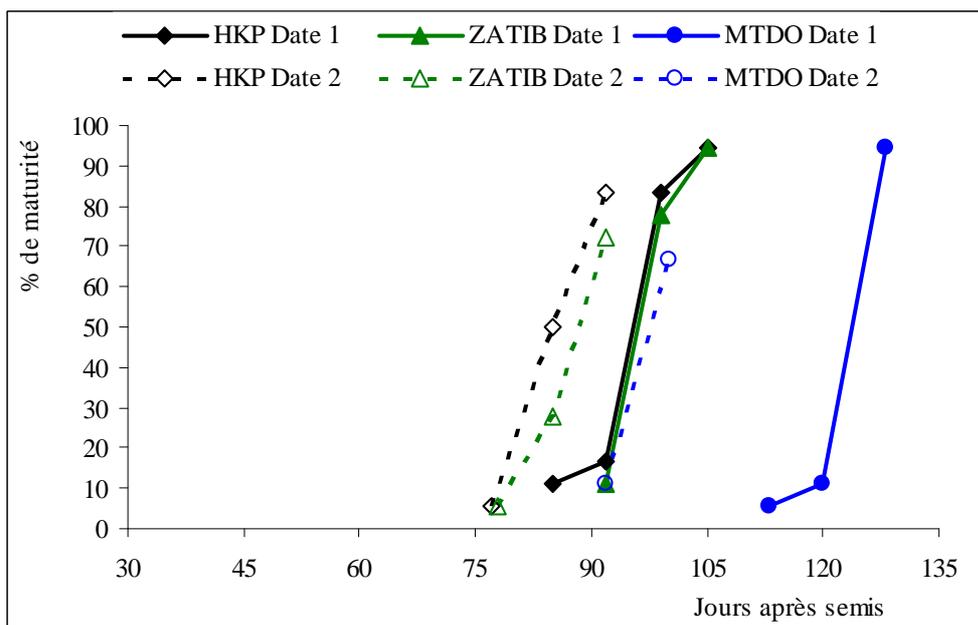


Figure 65 : Suivi de la maturité des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 24 juin et Date2 = 22 juillet*). Agrhymet, 2002.

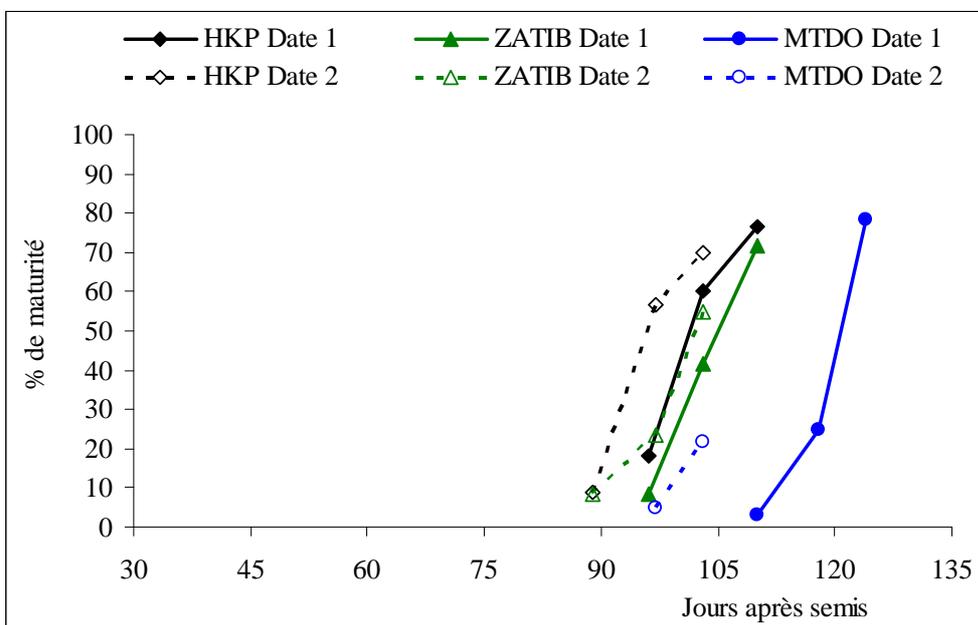


Figure 66 : Suivi de la maturité des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 03 juillet et Date 2 = 24 juillet*). Agrhymet, 2003.

10.5. Effet de la date de semis sur la durée du cycle des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO

En 2002, les variétés ont été semées le 24 juin (durée théorique du jour = 12 h 47 min) et le 22 juillet (durée du jour = 12 h 40 min). En 2003, les semis ont été fait le 03 juillet (durée du jour = 12 h 46 min) et le 22 juillet (durée du jour = 12 h 39 min).

Pendant la saison 2002, toutes les variétés étudiées ont réduit leur cycle de développement avec le retard de semis. Cette saison, les plants du 1^{er} semis ont atteint la maturité le 92^e JAS pour la variété HKP, le 99^e JAS pour la ZATIB et le 124^e JAS pour la MTDO. Cependant, avec le décalage de 28 jours du 2^e semis par rapport au 1^{er}, ces variétés ont bouclé leur cycle, respectivement le 78^e, 87^e et 105^e JAS (tableau XII). Ceci montre que ces variétés ont été sensibles aux facteurs du milieu, notamment la durée du jour et la température dont la variation influence la durée du cycle de développement de certaines céréales. En effet, Il a été montré que les photopériodes courtes permettent un développement rapide et une mise à fleur accélérée des variétés sensibles du mil (Franquin, 1987 ; Traoré *et al.*, 1995 ; Vaksman *et al.*, 1996).

Les résultats de cette étude ont bien attesté cela et ont permis de situer les phases phénologiques pendant lesquelles s'opère l'essentiel des modifications induites par ces facteurs climatiques chez les variétés étudiées. En effet, la différence variétale vis-à-vis de la sensibilité à la photopériode a été observée au niveau de la durée de certaines phases phénologiques, comme le tallage et la montaison (tableau XII). Les durées des phases de floraison et de maturation ont, quant à elles, été relativement invariables (dans les conditions climatiques de notre site) et ont duré environ 8 jours pour la première et 20 jours pour la seconde, quelle que soit la variété. Ainsi, la phase décisive d'expression de la sensibilité à la photopériode a été essentiellement celle du tallage et, dans une moindre mesure celle de la montaison (tableau XII). A défaut d'observation de la coupe de l'initiation paniculaire, le tallage constitue donc le stade focal qui est susceptible d'être avancé ou retardé sous l'action du stimulus physiologique induit par les changements de la photopériode. Le 2^e semis des variétés testées étant fait pendant la dernière décade du mois de juillet en 2002, les plants ont évolués sous des jours courts dès leur bas âge, pour raccourcir les premières phases de leur développement. Par ailleurs, le raccourcissement du cycle, dû au retard du semis, a entraîné la réduction du nombre de talles émises par ces variétés comparativement au semis précoce. Ceci confirme les résultats de Kassam et Andrews, (1975) ; Craufurd et Bidinger, (1988) ; Bacci *et al.*, (1998) ; Kouressy *et al.*, (1998) et Sangaré, (1999).

Cependant, les résultats obtenus en 2003, bien qu'ayant varié globalement dans la même logique, ont été caractérisés par des écarts relativement importants, par rapport à ceux de

2002. En effet, en 2003, les dates d'épiaison du 1^{er} semis ont été situées aux environ du 68^e JAS pour la HKP, 80^e JAS pour la ZATIB et 92^e JAS pour la MTDO. Au niveau du 2^e semis, l'épiaison a été atteinte vers le 70^e JAS pour la HKP, le 78^e JAS pour la ZATIB et plus tardivement vers le 95^e JAS pour la MTDO (tableau XIII), du fait du déficit hydrique causé par l'arrêt précoce des pluies en 2003. En effet, sous l'effet du stress hydrique vécu vers la fin de cette saison, il n'y a eu que 22 % des plants du 2^e semis de la variété tardive (MTDO) qui ont donné des épis portant des graines, à la récolte. Cette année, la récolte a eu lieu au 105^e jour après le 2^e semis, non pas parce que les épis étaient mûrs, mais plutôt du fait que les plants étaient déjà morts ou portaient des épis ayant avortés sous l'effet de la sécheresse vécue pendant 45 jours avant la récolte. En effet, sous l'impact de ce déficit hydrique, la croissance et le développement des plants des 2^e semis ont été ralentis en 2003. Ceci n'a pas permis d'observer la réduction des cycles de développement des variétés avec le retard du semis, comme observé en 2002. Les plants du 1^{er} semis de la HKP et de la ZATIB, dont le développement était avancé (floraison-maturité laiteuse), ont été les seuls à ne pas être affectés par le stress hydrique.

En 2002 tout comme en 2003, les phases épiaison-floraison et floraison-maturité n'ont pas varié de façon significative, tant avec les variétés qu'avec les dates de semis. Les quelques 2 à 4 jours d'écart observés pendant la phase floraison-maturité entre les plants du 1^{er} et ceux du 2^e semis de la HKP et de la ZATIB (tableau XIII) ne sont dus qu'à l'effet du stress hydrique.

Tableau XII : Durée (jours) des différentes phases phénologiques des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 1^{ère} date de semis et Date 2 = 2^e date de semis*). Agrhymet, 2002.

Variété/Date de semis	Semis-Lev	Lev-Mont	Mont-Epi	Epi-Flor	Flor-Mat	Semis-Mat
HKP Date 1	3	51	12	8	18	92
ZATIB Date 1	3	51	17	7	21	99
MTDO Date 1	3	63	28	9	21	124
HKP Date 2	3	33	13	8	21	78
ZATIB Date 2	3	38	18	8	20	87
MTDO Date 2	3	46	27	9	20	105

Avec : Semis-Lev = du semis à la levée ; Lev-Mont = de la levée à la montaison ; Mont-Epi = de la montaison à l'épiaison ; Epi-Flor = de l'épiaison à la floraison ; Flor-Mat = de la floraison à la maturité et Semis-Mat = du semis à la maturité.

Tableau XIII : Durée (jours) des différentes phases phénologiques des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis (*Date 1 = 1^{ère} date de semis et Date 2 = 2^e date de semis*). Agrhymet 2003.

Variété/Date de semis	Semis-Epi	Epi-Flor	Flor-Mat	Semis-Mat
HKP Date 1	68	7	19	94
ZATIB Date 1	80	7	18	105
MTDO Date 1	92	9	19	120
HKP Date 2	70	8	15	93
ZATIB Date 2	78	8	16	102
MTDO Date 2	95	10	----	----

Avec : Semis-Epi = du semis à l'épiaison; Epi-Flor = de l'épiaison à la floraison ; Flor-Mat = de la floraison à la maturité et Semis-Mat = du semis à la maturité.

10.6. Effet de l'urée sur l'épiaison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO

La date d'épiaison, connue dépendante de la variété, a aussi varié avec l'apport d'urée. Toutefois, en 2002 l'effet de l'urée n'a pas été significatif. En effet, les plants de HKP avaient épié à 50 % au 55^e JAS (1022 degrés jours) dans les parcelles non fertilisées en urée et au 58^e JAS dans celles fertilisées, soit un écart de 3 jours seulement (figure 67A). Les plants de la variété ZATIB ont atteint les 50 % d'épiaison au 58^e JAS, dans les parcelles sans urée, contre 60^e JAS (1112 degrés jours) dans celles fertilisées. A ces dates, la MTDO était encore en phase de montaison. Cette dernière n'a commencé à émettre des épis qu'au 68^e JAS, avec 3 % de plants épiés dans les parcelles non fertilisées (figure 67A). En effet, les plants de cette variété à cycle plus long ont atteint les 50 % d'épiaison, tardivement vers le 80^e JAS en 2002.

En 2003, l'effet de l'urée a été significatif sur l'épiaison de toutes les variétés. Cette année, l'épiaison a été retardée chez toutes les variétés, comparativement à 2002 (figure 67B). L'épiaison (à 50 % des plants) n'a été atteinte, en l'absence d'urée, qu'au 73^e JAS (1332 degrés jours) pour la HKP et au 69^e JAS pour la ZATIB, contre 63^e JAS et 65^e JAS, respectivement pour les plants fertilisés de ces deux variétés. Ainsi, l'épiaison de ces variétés a été plus accélérée dans les parcelles fertilisées en urée que dans celles qui ne le sont pas ; ce qui est contraire à ce qui a été observé en 2002. Par contre, chez la MTDO c'est plutôt les plants non fertilisés qui ont atteint les 50 % d'épiaison un peu plus tôt vers le 100^e JAS (1816 degrés jours), contre le 117^e JAS (2171 degrés jours) pour ceux fertilisés en urée (figure 67B). Ainsi, outre l'effet de l'urée, l'épiaison de toutes les variétés a été retardée en 2003 par rapport à 2002, à cause des dates de semis qui ont été différentes de 2002 à 2003 (15 juillet 2002 et 17 juin 2003). Ce qui confirme la sensibilité de ces variétés à la photopériode.

Quant aux variations observées d'une saison à l'autre sous l'effet de l'urée, elles seraient liées aux différences dans les régimes pluviométriques des saisons. En effet, les épisodes secs observés en 2002 ont permis aux plants moins vulnérables du traitement non fertilisé d'avoir une épiaison plus accélérée que ceux fertilisés. Cette hypothèse se confirme par le fait qu'en 2003, saison ayant été plus pluvieuse, les plants fertilisés ont bien profité de l'apport d'urée en épiant plus tôt que ceux non fertilisés, dont la croissance a en plus été retardée par la pauvreté du sol en azote. Ceci rappelle les résultats de Labo (1992). Quant à la MTDO, elle a eu un comportement particulier en 2003 en épiant plus tôt, en l'absence d'urée qu'en sa présence. Ceci est dû au fait que, la saison 2003, quoique n'ayant pas connu de stress hydrique de mi-parcours, avait pris fin précocement au 94^e JAS ; avant l'épiaison de cette variété. Le déficit en eau qui en est résulté a ainsi plus affecté l'épiaison des plants dont le développement a été rendu exubérant par l'urée avant l'arrêt des pluies. En effet, Anonyme (1993) indique que l'excès d'urée retarde l'épiaison en favorisant la croissance végétative.

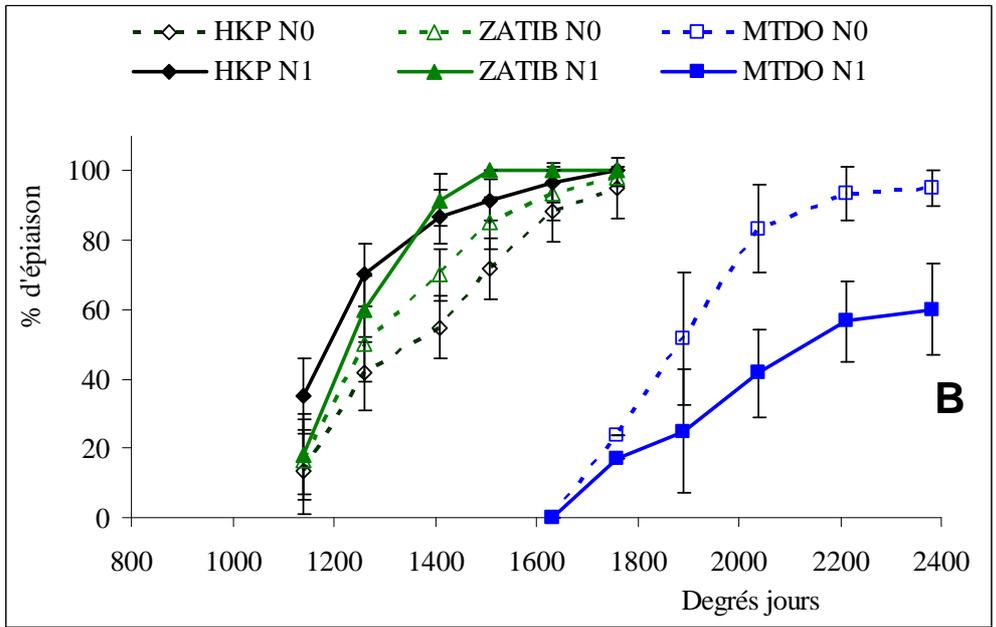
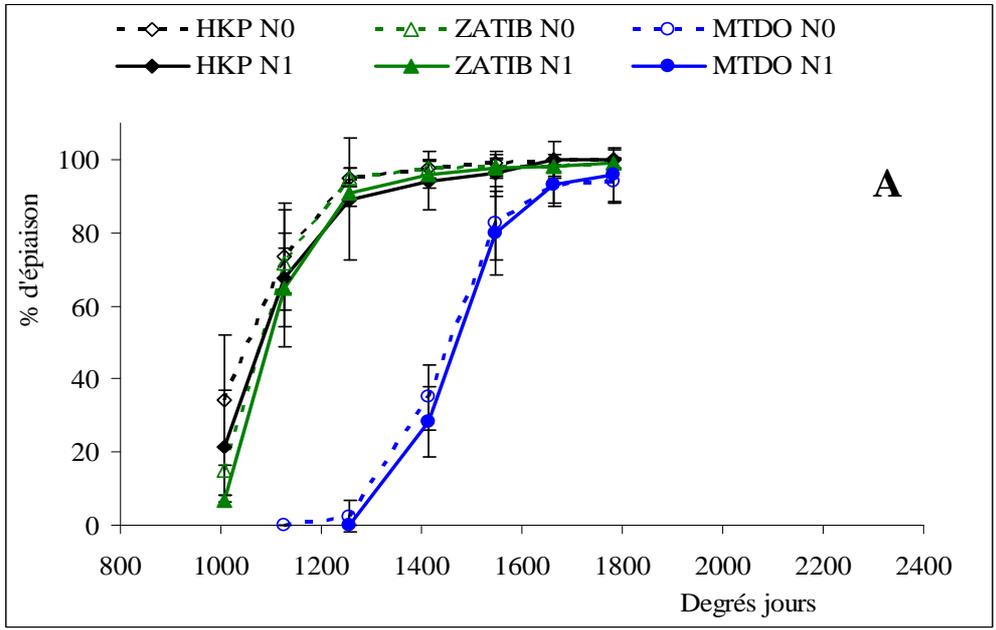


Figure 67 : Effet de l'urée sur l'épiaison des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO ($N0 = 0$ $kg\ ha^{-1}$ et $N1 = 100\ kg\ ha^{-1}$ d'urée). Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002 (A) et 2003 (B)

10.7. Effet de la densité de semis et de l'urée sur la variation de l'humidité du sol

L'essai a concerné la variété de mil ZATIB. Les humidités du sol calculées prennent en compte la densité apparente (d_a) du sol du site d'essai. Cette d_a a été déterminée à une valeur moyenne de 1,8, aussi bien pour les parcelles en conditions hydriques pluviales strictes que pour celles réservées à des irrigations complémentaires. Aussi élevée qu'elle parait, cette valeur est du même ordre de grandeur que celle donnée par le calcul effectué à partir des données gravimétriques fournies par Denis *et al.*, (1984) et par Gérard (1990) et en utilisant le logiciel Soilhydr qui a été développé sur la base des travaux de Saxton *et al.*, (1986).

10.7.1. En conditions pluviales strictes

En 2002, la 1^{ère} mesure a été faite avant le semis sur un sol qui avait déjà été humecté par un cumul de pluies de 142,4 mm en juin ; ce qui explique le niveau des stocks d'eau dans le sol de l'ordre de 16 à 21 mm à l'horizon 0-40 cm, au 6^e JAS (figure 68). Au 27^e JAS, l'humidité du sol a été autour de 24 mm. Cette valeur a été presque la même pour tous les traitements. Il y a eu une chute du stock d'eau dans le sol, autour du 60^e JAS. Cette chute du stock d'eau a été plus marquée au niveau des traitements N1 et D2 (figures 68 et 70). Cependant, une remontée de l'humidité du sol a été observée dans toutes les parcelles, vers la fin du cycle.

En 2003, le cumul pluviométrique enregistré avant le semis était de 67,4 mm seulement. Cependant, le stock d'eau dans les couches 0-40 cm et 0-80 cm a d'une manière générale été constamment plus élevé qu'en 2002 (figures 69 et 71). Dans la couche 0-40 cm, il a évolué entre 20 et 70 mm pendant la saison selon les traitements, et a atteint quelques fois des valeurs dépassant le double de celles observées en 2002, dans la même couche de sol (figures 68 et 69). Les écarts entre les différents traitements d'urée et de densité de semis ont été plus grands en 2003 qu'en 2002 (figures 68 et 69). La densité de semis a eu un effet moins marqué que l'apport d'urée, sur les variations du stock d'eau dans le sol. En l'absence d'urée, le stock d'eau était plus élevé sous la densité D2 que sous D1. Avec l'apport d'urée, l'humidité du sol a évolué presque de la même manière sous les deux densités de semis (figure 69).

On constate aussi que les variations se font dans le même sens dans les franges sous-jacentes jusqu'à la profondeur 80 cm (figures 70 et 71). Dans ces franges, les stocks hydriques ont varié entre 39 et 73 mm en 2002 (figure 70) et entre 40 et 120 mm en 2003 (figure 71), selon les traitements. Au-delà de la couche du sol 0-80 cm, les différences entre les traitements se réduisent avec la profondeur et le stock d'eau y devient quasiment constant vers la limite du front d'humectation en 2002. En 2003 le stock d'eau a été deux à trois fois plus élevé (à 120 cm de profondeur) durant toute la période entre le 60^e et le 105^e JAS. Il a atteint 180 mm sous les traitements N0 et D1 et 130 mm sous les traitements intenses N1 et D2.

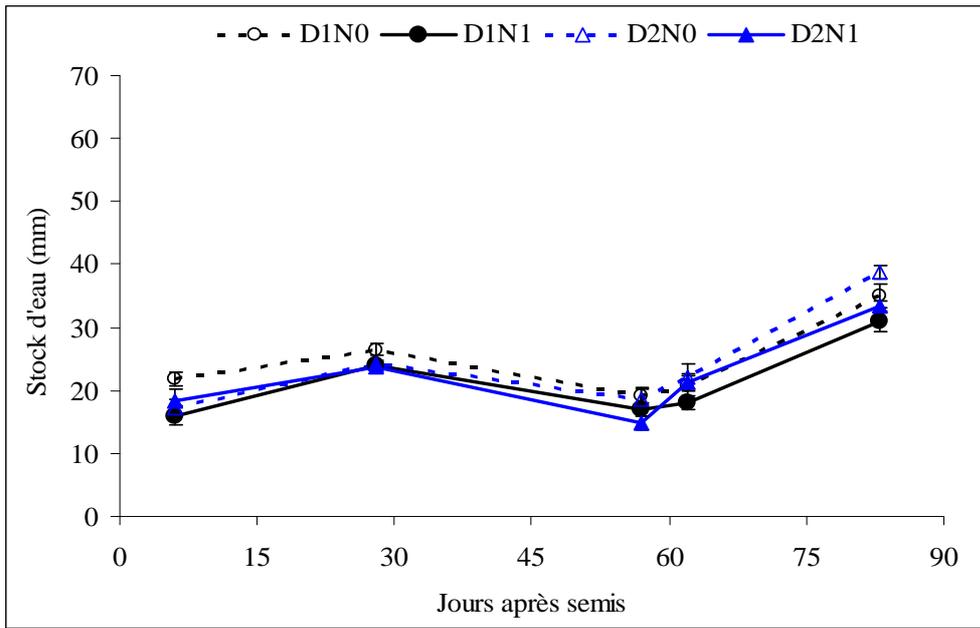


Figure 68 : Variation du stock d'eau dans les tranches de sol 0-40 cm sous les effets de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales, chez la variété de mil ZATIB. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

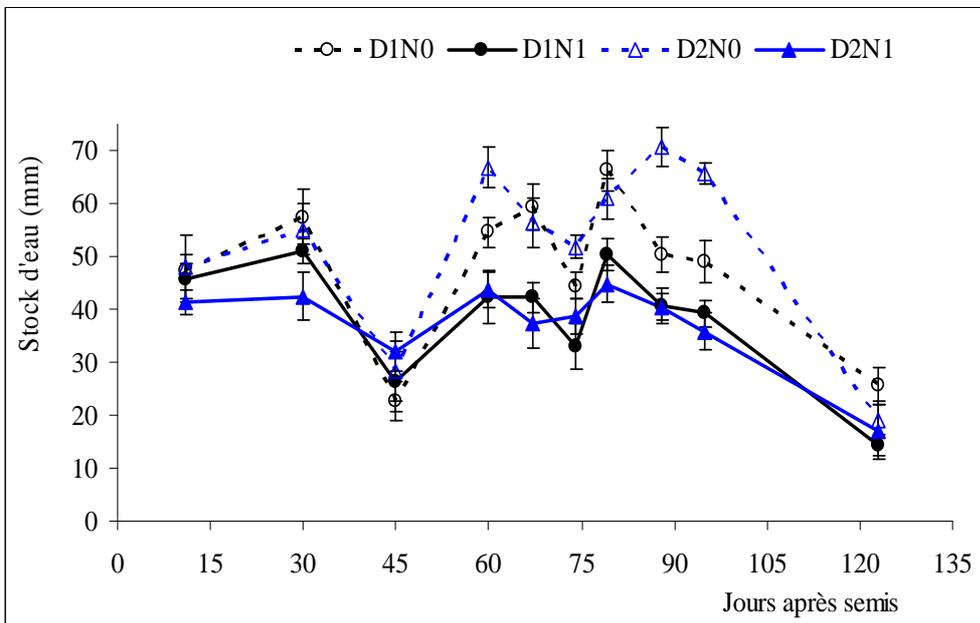


Figure 69 : Variation du stock d'eau dans les tranches de sol 0-40 cm sous les effets de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales, chez la variété de mil ZATIB. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

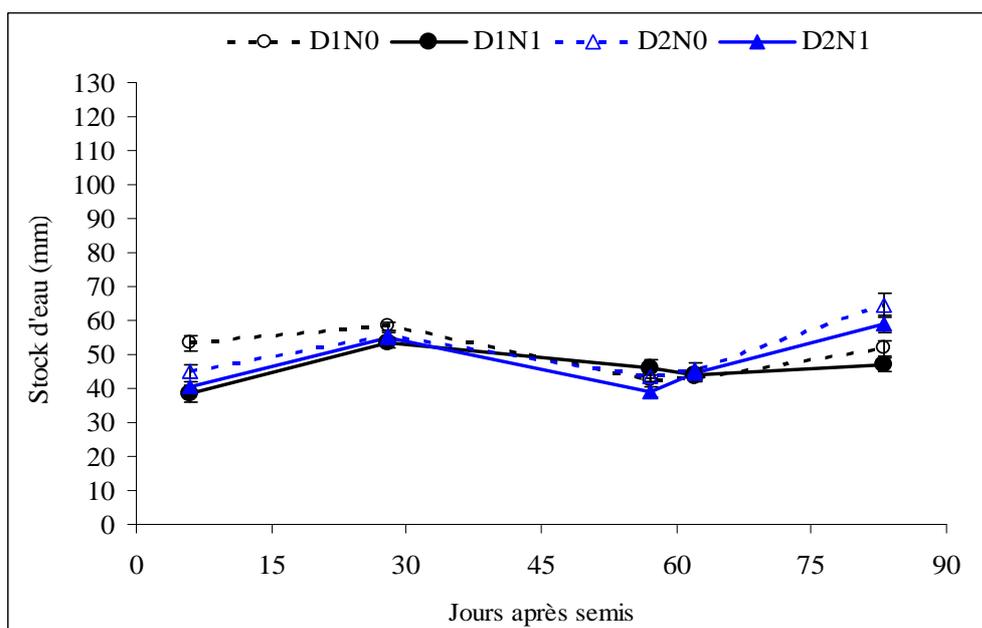


Figure 70 : Variation du stock d'eau dans les tranches de sol 0-80 cm sous les effets de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

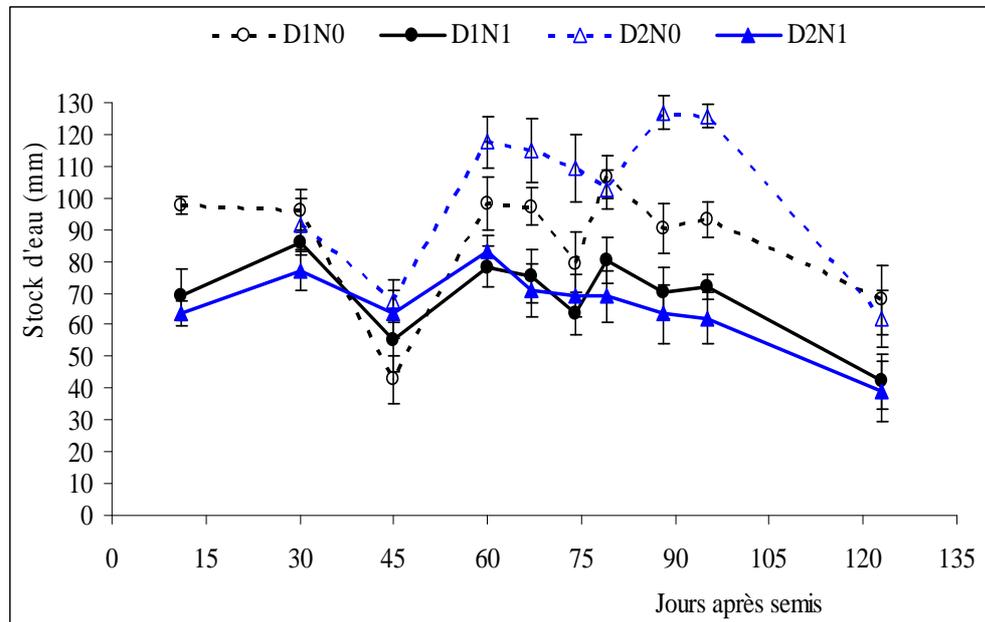


Figure 71 : Variation du stock d'eau dans les tranches de sol 0-80 cm sous les effets de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et de l'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

Il ressort de ces résultats qu'en 2003, le cumul pluviométrique enregistré avant le semis a été moins important qu'en 2002. Cependant, le stock d'eau dans le sol a été, en général, constamment plus élevé qu'en 2002. Ceci montre qu'en 2003, les plants n'ont pas souffert de stress hydrique sévère, comparativement à 2002. Le seul épisode sec, montrant une chute assez importante du stock d'eau dans le sol au cours de cette saison, a été observé au 45^e JAS (fin juillet), à un moment où les plants étaient encore très petits (avant le démariage) et avaient par conséquent des besoins hydriques faibles.

Les écarts qui ont été plus grands en 2003 qu'en 2002, entre les différents traitements d'urée et de densité de semis, peuvent être attribués à la différence dans la répartition des pluies. Les résultats ont montré qu'en l'absence d'urée, le stock d'eau était plus élevé sous la densité D2 que sous D1. Ceci, est dû au fait que les plants du traitement N0xD2 avaient une biomasse foliaire faible et donc consomment peu d'eau, contrairement à ceux du traitement N0xD1 qui ont eu une biomasse foliaire plus abondante, du fait de leur faible nombre dans la parcelle. Si en présence d'urée, l'humidité du sol a été la même sous les deux densités de semis, cela montre que la dose de 100 kg ha⁻¹ d'urée a été suffisante pour permettre aux plants de la faible densité (D1) de produire assez de biomasse, donc d'avoir des besoins hydriques comparables à ceux des plants de la forte densité (D2). Pour toutes les observations effectuées lorsque le sol était moins humide, le stock d'eau a été constamment plus bas dans les parcelles avec urée que dans celles sans urée et cela au niveau des deux densités de semis. Ceci montre que l'apport d'urée a contribué à augmenter la consommation hydrique, du fait du développement foliaire qu'il a provoqué. En effet, plus la couverture foliaire est grande, plus la consommation hydrique devient élevée, ce qui épuise rapidement la réserve en eau du sol et par conséquent rend les plants plus vulnérables au déficit hydrique. C'est ainsi qu'en 2002, l'effet de l'épisode sec du mois de septembre a été plus accentué chez les plants fertilisés de la forte densité de semis. Affholder (1994) et Diouf *et al.*, (2004) ont abouti aux mêmes conclusions par rapport à la réponse du mil à la fertilisation azotée en situation de stress hydrique. Dans la frange 0-80 cm, les variations de stocks hydriques ont été moins importantes en 2002 qu'en 2003, selon les traitements. Ceci est dû au fait que la saison 2003 n'a pas connu d'épisodes secs importants.

Au-delà de la couche du sol 0-80 cm, les différences entre les traitements se sont réduits avec la profondeur et le stock d'eau y est devenu quasiment constant, vers la limite du front d'humectation en 2002. Ceci montre que cette année, les racines dont la croissance dépend du front d'humectation et du type de sol, ont puisé surtout dans la frange de sol de 80 cm. En 2003, le stock d'eau a par contre atteint 80 mm sous les traitements N0 et D1 et 130 mm sous les traitements intenses N1 et D2. Ceci s'explique par le fait qu'à ces profondeurs où l'évaporation du sol est faible, la pluviosité relativement régulière aurait permis au stock

hydrique d'être constamment alimenté par l'infiltration à partir des couches sus-jacentes. En outre, les pluies assez bien réparties dans le temps auraient permis aux plants de puiser suffisamment en surface et mettre ainsi les zones profondes à l'abri du pompage massif des racines.

10.7.2. En irrigations complémentaires

En 2002, les mesures d'humidité du sol n'ont concerné que le traitement fertilisé en urée de la forte densité de semis (D2xN1), en conditions d'irrigations complémentaires. Avec les irrigations complémentaires, le stock d'eau dans la tranche 0-40 cm du sol a été régulièrement plus élevé qu'en conditions pluviales strictes, aussi bien en 2002 qu'en 2003 (figures 72 et 73). Les irrigations effectuées pendant les épisodes secs, aux 31^e et 53^e JAS en 2002 et aux 39^e et 48^e JAS en 2003, ont permis de maintenir constamment plus d'humidité à la disposition des plants. Notons cependant qu'en 2003, le stock d'eau, étant en début de saison à plus de 60 mm dans la tranche superficielle du sol 0-40 cm (figure 74), a connu une chute progressive durant le cycle jusqu'à des valeurs inférieures à 50 mm pour tous les traitements. Ceci s'explique par le fait que les besoins en eau de la culture augmentent avec le développement des plants pour devenir plus élevés pendant la phase de reproduction (Diouf, 2000 ; Mason, 2001 ; Diouf *et al.*, 2004). Cependant, cette situation n'a pas été observée en 2002, du fait des pluies recueillies tardivement en octobre (au 80 JAS) qui ont relevé le niveau des stocks d'eau (figure 72).

En 2003, tous les traitements ont été concernés par cette étude de variation du stock d'eau en conditions d'irrigations complémentaires. Cependant, les résultats obtenus n'ont pas présenté des différences significatives entre les différents traitements d'urée et de densité de semis, comme c'était le cas cette année en conditions pluviales strictes (figures 69, 71, 74 et 75). Les quelques écarts discontinus qui s'observent entre les traitements vers le début et la fin du cycle (figures 74 et 75) s'expliqueraient non seulement par la disponibilité de l'eau dans le sol, mais aussi par l'évaporation du sol qui, sans doute, a été plus élevée dans les parcelles non fertilisées des deux densités de semis. Ce changement de tendance par rapport aux résultats obtenus en conditions pluviales strictes pourrait aussi s'expliquer par l'hétérogénéité dans les caractéristiques physiques du sol dont dépend la capacité de stockage de l'eau et qui, selon Denis *et al.*, (1984), sont quelques fois un peu hétérogène dans la tranche 100-180 cm (sol peu profond à profond).

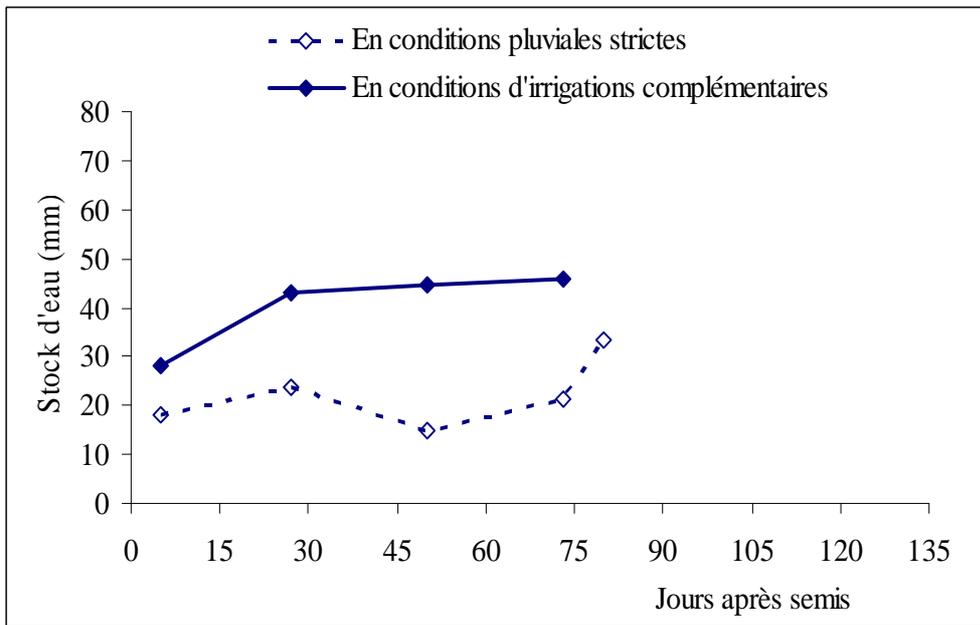


Figure 72 : Evolution comparée du stock d'eau dans la tranche de sol 0 - 40 cm en pluvial strict et en irrigué, sous le traitement D2 (31 250 plants ha⁻¹) x N1 (100 kg ha⁻¹ d'urée). Agrhymet, 2002.

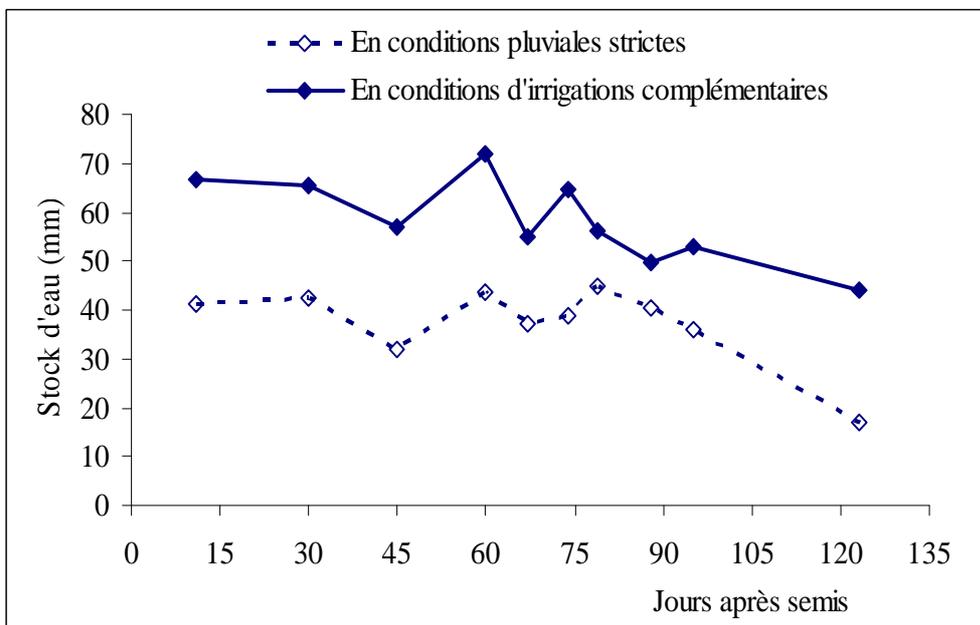


Figure 73 : Evolution comparée du stock d'eau dans la tranche de sol 0 - 40 cm en pluvial strict et en irrigué, sous le traitement D2 (31 250 plants ha⁻¹) x N1 (100 kg ha⁻¹ d'urée). Agrhymet, 2003.

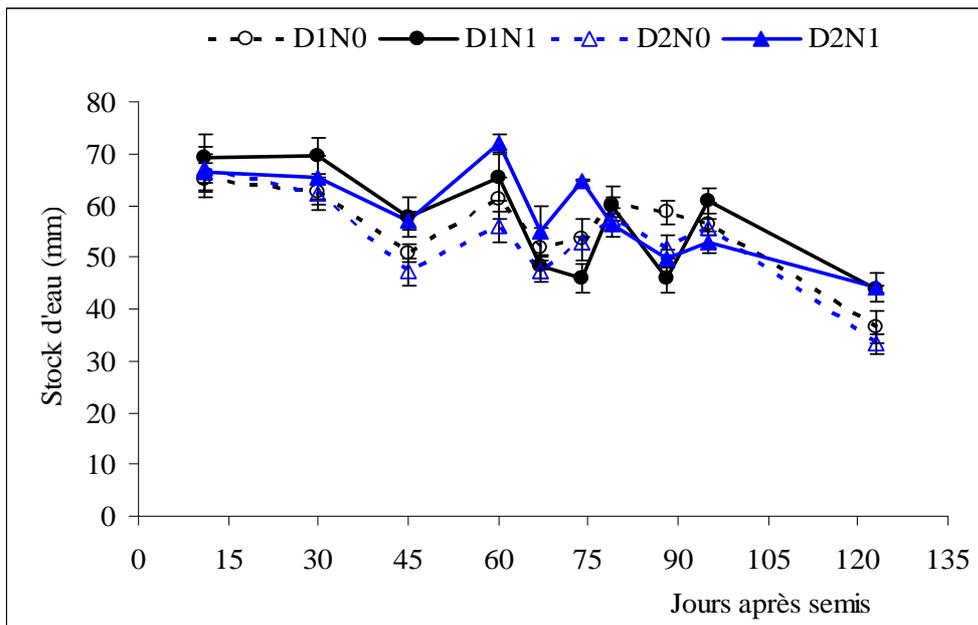


Figure 74 : Variation du stock d'eau dans la tranche 0-40 cm du sol selon la densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et le niveau d'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions d'irrigations complémentaires. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

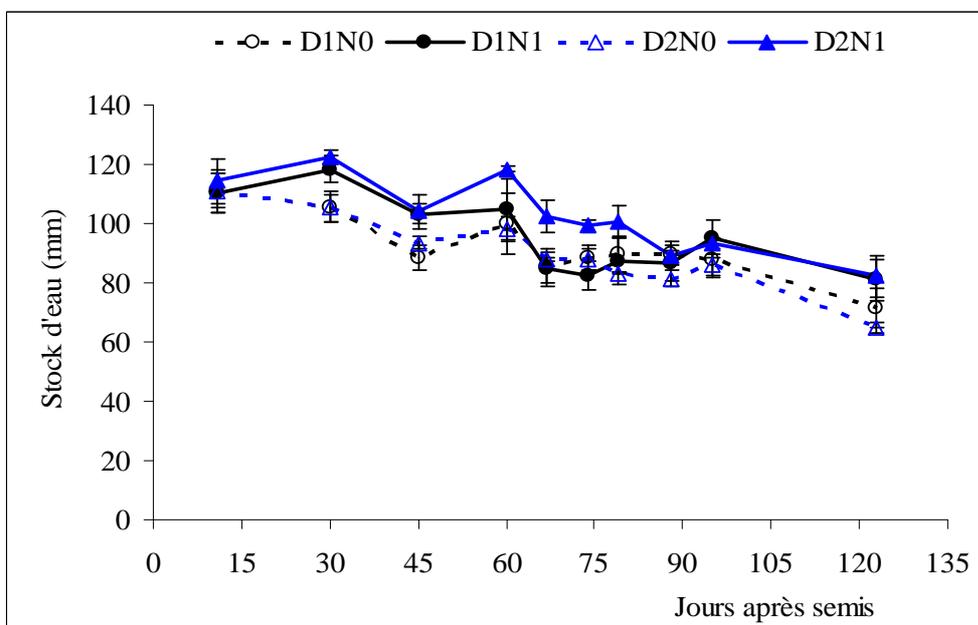


Figure 75 : Variation du stock d'eau dans la tranche 0-80 cm du sol selon la densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et le niveau d'apport d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions d'irrigations complémentaires. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

10.8. Effet de la densité de semis et de l'urée sur la variation de l'ETR

10.8.1. En conditions pluviales strictes

Les variations de la consommation hydrique observées ci-dessus, trouvent leur justification à travers les fluctuations de l'ETR durant les saisons et en fonction des interactions entre les différents traitements d'urée et de densité de semis (figures 76 et 77). En 2002, l'ETR a été plus élevée au niveau des plants fertilisés des deux densités de semis, jusqu'aux environs du 60° JAS. A partir de cette date, on a observé une chute de l'ETR qui a été particulièrement plus importante dans les traitements intensifiés (figure 76). Suite à cette inversion de tendance, des différences significatives ont été observées entre les traitements d'urée et de densité de semis. En 2003, l'ETR a été moins élevée au niveau des plants fertilisés et/ou semés à forte densité qu'au niveau de ceux non fertilisés et/ou semés à faible densité, entre le 30° et 50° JAS. Cependant, du 75° JAS à la fin du cycle, elle a été moins élevée chez les plants non fertilisés des deux densités de semis, jusqu'à la fin du cycle (figure 77). Cette figure montre qu'en 2003, l'effet de la densité de semis n'a été significatif que dans les parcelles n'ayant pas reçu l'urée, après le 80° JAS.

La chute brutale de l'ETR observée en 2002, est survenue suite au stress hydrique vécu. Les plants des traitements intensifiés ont été les plus affectés par ce stress hydrique. Ceci s'explique par le fait que ces plants intensifiés, dont les besoins en eau avaient été augmentés avant le stress, ont épuisé plus vite le stock d'eau dans le sol que ceux plus espacés et/ou non fertilisés. L'ETR a moins baissé au niveau du traitement N0xD1 dont les plants étaient moins développés et, par conséquent, moins sensibles au stress hydrique. Dancette (1991) et Laouan (1996) ont obtenu des résultats similaires et ont indiqué que l'ETR augmente avec le développement foliaire pour diminuer avec la sénescence et l'épuisement de la réserve hydrique. Ceci a été confirmé par les résultats des deux années d'essais qui montrent que les ETR croissantes correspondent toujours aux phases actives de développement foliaire : entre le 30° et le 60° JAS en 2002 et du 50° JAS à la récolte en 2003.

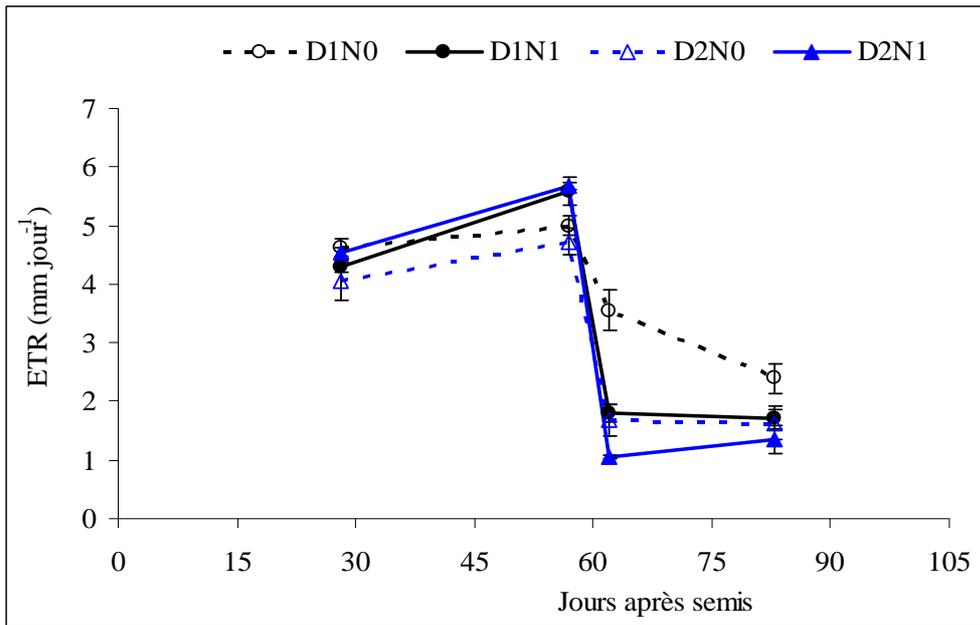


Figure 76 : Variation de l'ETR de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales strictes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2002.

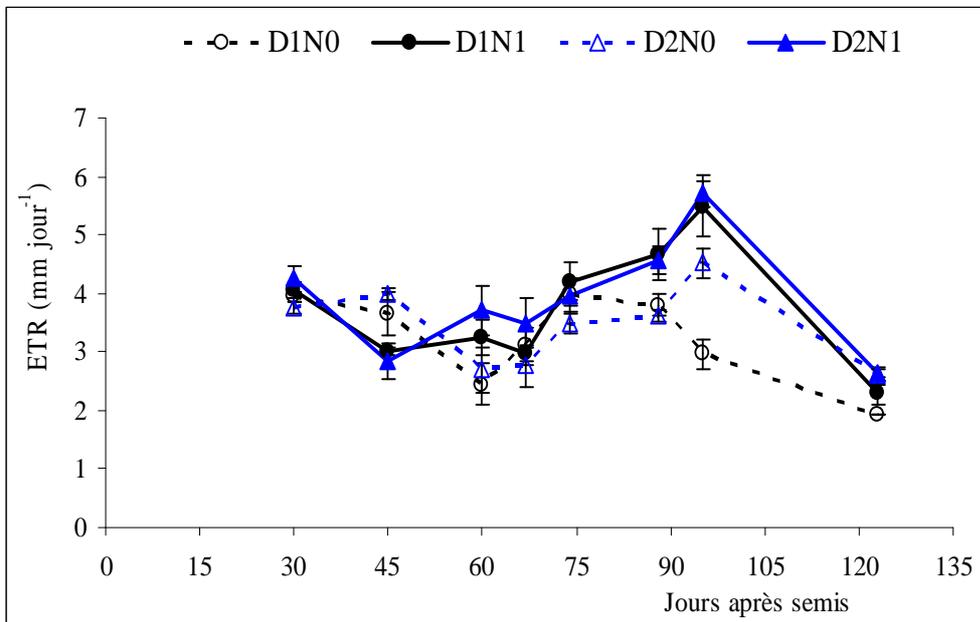


Figure 77 : Variation de l'ETR de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions pluviales strictes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

10.8.2. En irrigations complémentaires

Seuls les résultats obtenus en 2003 sont présentés dans cette partie pour illustrer les variations de l'ETR dans les parcelles irriguées. Ainsi, les variations observées montrent qu'en 2003, les apports d'eau additionnels du 39^e et 48^e JAS ont permis une montée importante de l'ETR durant les 15 jours qui ont suivi. Cette situation a permis aux traitements intensifiés de garder les plus grandes valeurs d'ETR pendant la phase critique de développement foliaire, c'est-à-dire entre le 45^e et le 90^e JAS (figure 78). Avant et après cette phase, c'est au niveau des traitements non fertilisés des deux densités de semis que l'ETR a été plus élevée. Ceci, s'explique non seulement par le fait que leur couvert végétatif était peu développé et favorable à l'évaporation du sol, mais aussi par l'impact du léger déficit hydrique observé vers le 45^e JAS et de la sénescence foliaire de fin de cycle qui a été plus précoce dans les parcelles fertilisées. Ceci concorde avec les résultats de Dancette (1991) et Laouan (1996).

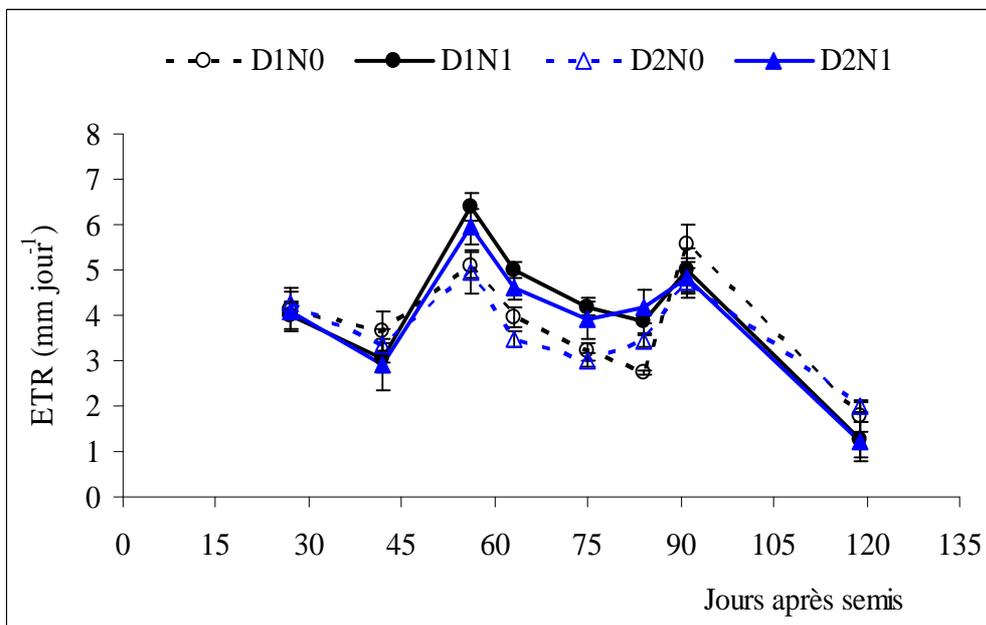


Figure 78 : Variation de l'ETR de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions d'irrigations complémentaires. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Agrhymet, 2003.

10.9. Effets de l'urée et de la densité de semis sur l'évaporation du sol

10.9.1 En conditions pluviales strictes

Les résultats obtenus montrent que l'évaporation du sol a été constamment plus élevée dans les parcelles à faible couverture végétative, c'est-à-dire au niveau des traitements N0xD1 et N0xD2 (figure 79). Cependant, avec l'apport d'urée (N1), elle a été constamment plus élevée au niveau de la faible densité de semis (D1), comparativement à la forte (D2). Dans les parcelles non fertilisées, c'est plutôt D2 qui a présenté les valeurs d'évaporation les plus élevées en début de végétation. A partir du 64^e JAS, les tendances ont été inversées, avec les parcelles à forte densité (D2) évaporant le moins. En effet, le développement foliaire des plants n'ayant pas reçu d'urée a accusé un retard qui a été rattrapé plus tard chez ceux densément semés, d'où la diminution de l'évaporation du sol chez ces derniers vers la fin du cycle. Ceci peut s'expliquer, comme l'ont aussi montré Jara *et al.*, (1998), par le fait que l'évaporation du sol diminue progressivement avec l'augmentation du LAI.

10.9.2. En irrigations complémentaires

Sur la figure 80, on remarque que, contrairement à ce qui a été observé en conditions pluviales, il y a eu en irrigué des périodes où l'évaporation a été beaucoup plus faible au moment où l'ET_o était très élevée. Cette figure montre également que les écarts entre les différents traitements ont été pratiquement les mêmes qu'en pluvial, en dépit des irrigations complémentaires effectuées.

Cependant, lorsque le sol est suffisamment humide, aussi bien en pluvial qu'en irrigué, l'atmosphère se charge rapidement de vapeur d'eau (humidité relative) au-dessus du couvert de la culture, ce qui ralentit l'évaporation du sol. Cette situation, pouvant persister plusieurs heures ou plusieurs jours, favorise la formation des rosées nocturnes qui humidifient les microlysimètres à des degrés différents selon qu'ils soient protégés ou non par le couvert végétal de la culture. Les mesures se faisant tôt le matin, les dépôts d'eau par la rosée entraînent une augmentation du poids des microlysimètres les plus exposés, donc une sous-évaluation de leur évaporation du jour précédent. Ceci a été constaté dans nos mesures qui ont souvent montré des évaporations plus élevées chez les lysimètres mieux couverts par la végétation que chez ceux qui sont exposés, notamment aux 34, 37, 42, 60, 68, 71 et 75^e JAS (figure 81). Des mesures parallèlement effectuées sur sol nu ont confirmé cela en donnant des résultats d'évaporation qui sont plus faibles que celles obtenues sous le couvert pour plusieurs jours pendant le cycle. Ceci a provoqué des irrégularités dans les variations attendues de l'évaporation du sol en fonction des traitements agronomiques testés, selon qu'on est en situation de forte ou de faible humidité relative. Pour éviter de telles aberrations dans un test

similaire au nôtre, il est serait alors recommandable d'effectuer les observations le soir, vers le coucher du soleil, que de les faire tôt le matin.

Cependant, en considérant uniquement les jours à forte demande évaporative, notre test nous a permis d'obtenir des fluctuations d'évaporation du sol allant dans le même sens que celles des ETo journalières calculées (figures 79 et 80). Nous avons également pu déterminer la part de l'évaporation du sol par rapport à l'ETR de la culture, selon les traitements d'urée et de densité de semis en conditions pluviales strictes (figure 82). Cette figure montre que ce sont les traitements de la faible densité (D1) et celui non fertilisé de la forte densité (D2xN0) qui ont eu les taux d'évaporation sol les plus élevés. En effet, il ressort à travers les résultats des jours pris en exemple, que l'évaporation du sol est très variable et peut constituer 42 à 94 % de l'ETR du jour, selon la demande évaporative et le taux de couverture végétative du sol. Ceci est relatif, non seulement aux potentialités de développement de la culture du mil sous les effets des pratiques culturales (densité de semis, apport de fertilisants), mais au rayonnement global et aux températures élevés qui caractérisent les saisons pluvieuses au Sahel (Begué, 1991 ; Amadou, 1994).

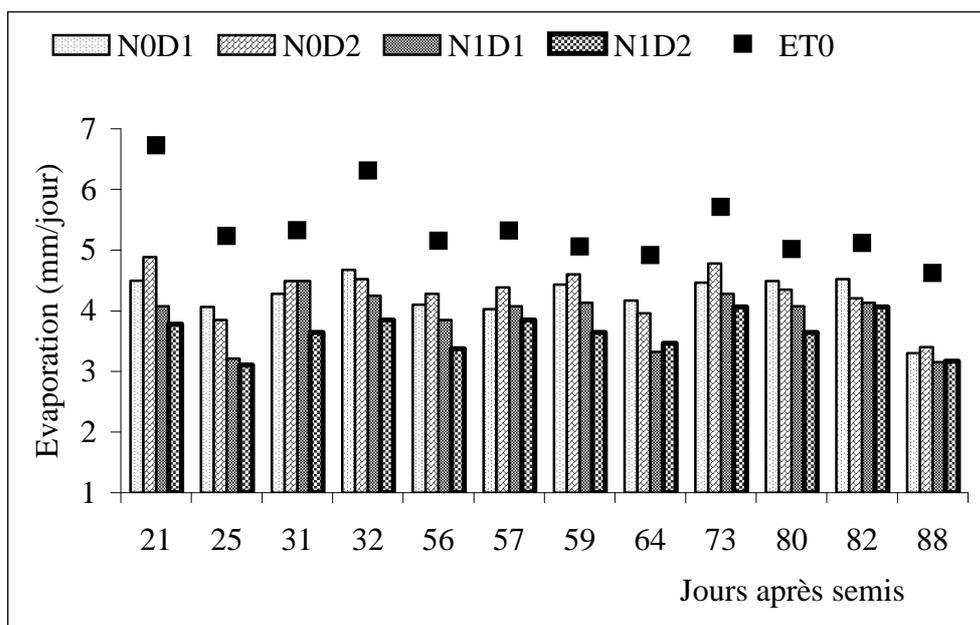


Figure 79 : Variation de l'évaporation sol sous le couvert de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions hydriques pluviales. Agrhymet, 2003.

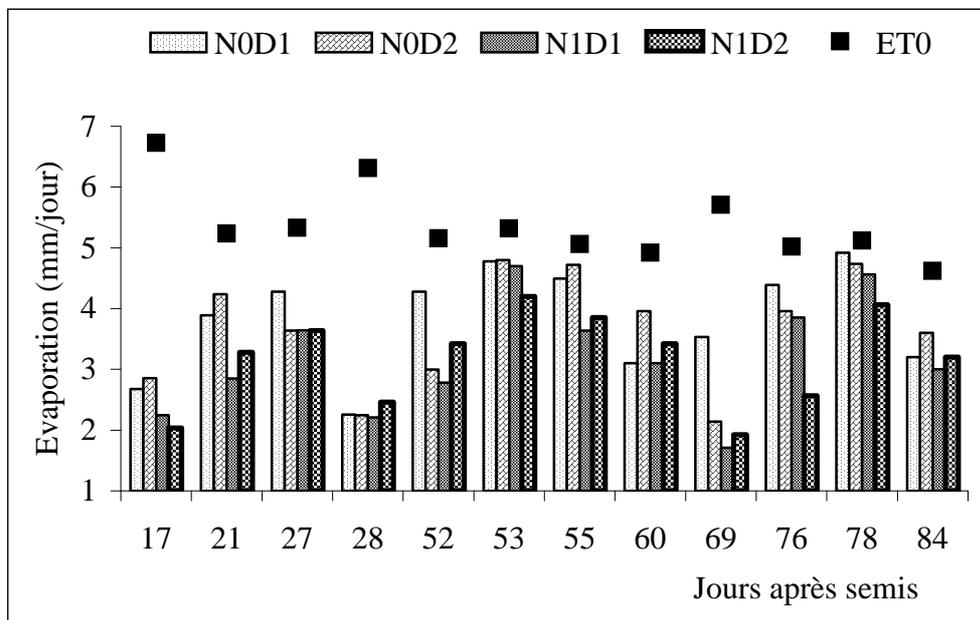


Figure 80 : Variation de l'évaporation sol sous le couvert de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$) et la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) en conditions d'irrigations complémentaires. Agrhymet, 2003.

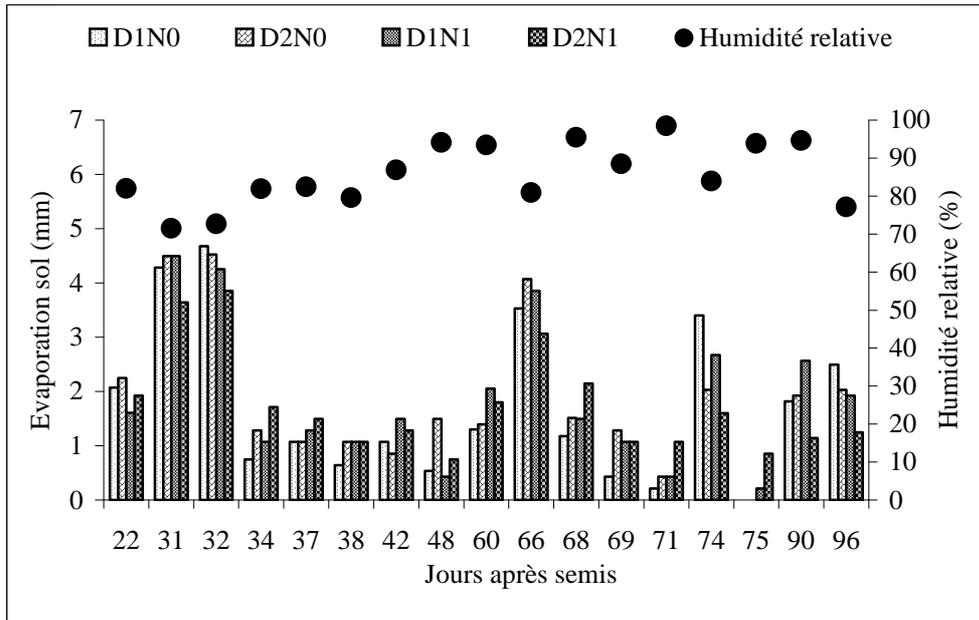


Figure 81 : Variation de l'évaporation sol sous l'influence des humidités relatives maximales journalières pour 2 densités de semis de la variété de mil ZATIB : D1 (16666 plants ha^{-1}) et D2 (31250 plants ha^{-1}) associées à 2 doses d'urée N0 (0 $kg\ ha^{-1}$) et N1 (100 $kg\ ha^{-1}$), en conditions hydriques pluviales. Agrhymet, 2003.

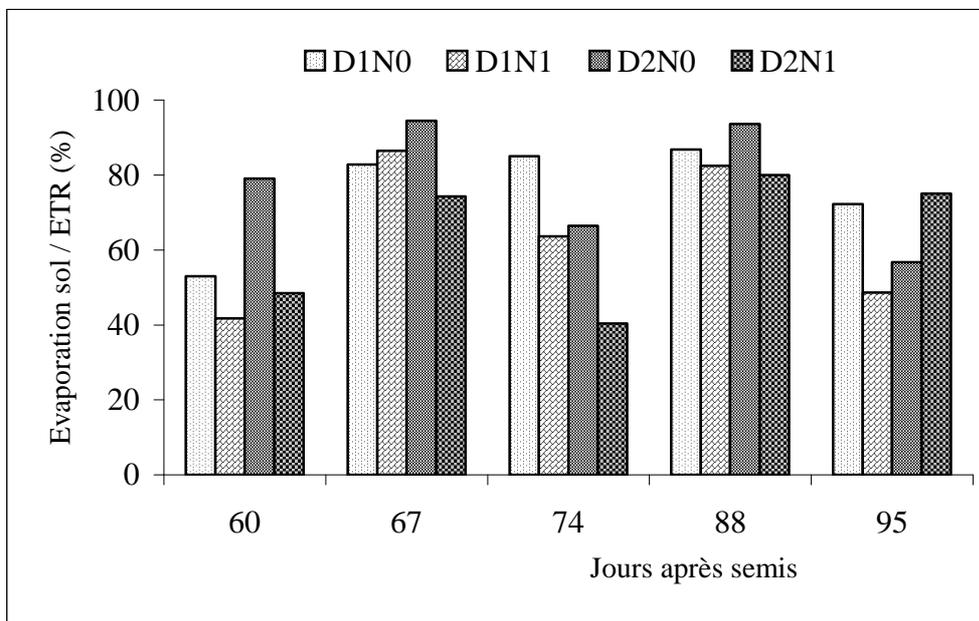


Figure 82 : Proportions occupées par l'évaporation sol dans les ETR journalières de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis (D1 = 16666 plants ha^{-1} et D2 = 31250 plants ha^{-1}) et la dose d'urée (N0 = 0 $kg\ ha^{-1}$ et N1 = 100 $kg\ ha^{-1}$) en conditions hydriques pluviales. Agrhymet, 2003.

10.10. Effet de la date de semis sur les rendements des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO

10.10.1. Rendements grains

En 2002, il n'y a pas eu de différences significatives entre les rendements grains donnés par les trois variétés pour toutes les dates de semis (annexe 4). Cependant, au niveau du 1^{er} semis, la ZATIB et la MTDO ont eu des rendements grains plus élevés que celui de la HKP. Avec le retard de semis, les rendements des variétés semi-tardive (ZATIB) et tardive (MTDO) ont diminué par rapport au 1^{er} semis, cela à la différence de la variété précoce, HKP (tableau XIV). Cependant, cette diminution n'a été statistiquement significative que pour la variété MTDO. En effet, comparativement aux résultats du 1^{er} semis, ce tableau montre que le rendement grains de la MTDO a été le plus réduit (43 %) suivi de celui de la ZATIB (30 %), au moment où celui de la HKP augmentait de 22 %, avec le 2^e semis.

L'interaction entre le comportement variétal et la date de semis n'a pas été significative au seuil de 5 %, mais les variations observées permettent de noter que le rendement grains des variétés tardive et semis-tardive a été plus élevé avec le 1^{er} semis. Le rendement grains plus élevé de la 2^e date de semis de la HKP en 2002 s'explique par le nombre d'épis plus élevé et mieux remplis que ceux du 1^{er} semis (tableau XV). La variété ZATIB développe généralement moins de talles que la HKP et encore moins que la MTDO. Le plus haut rendement grains (1803 kg ha⁻¹) qu'elle a fourni avec le 1^{er} semis en 2002, doit son explication non seulement aux épis, mais aussi aux grains plus gros et mieux remplis qu'elle produit (tableau XV).

En 2003, les rendements grains ont été significativement différents au seuil de 5 %, aussi bien pour les variétés que pour les dates de semis (annexe 4). Cependant, pour le semis tardif, il n'y a pas eu de différences significatives entre les variétés (tableau XIV). Egalement, ce tableau montre que l'interaction entre les variétés et les dates de semis n'a pas été significative. En 2003, les meilleurs rendements grains ont été obtenus avec la variété ZATIB pour le 1^{er} semis et la HKP pour le 2^e semis. Cette saison, toutes les variétés ont vu leur rendement grains diminuer avec le retard du semis. Ceci, du fait non seulement de l'arrêt des pluies qui a été plus précoce qu'en 2002, mais aussi du début difficile qu'a connu l'essai (ressemis) et de la baisse de la fertilité du sol par rapport à la saison précédente (tableau XIV). En effet, la sécheresse de fin de cycle, observée pendant 45 jours avant la récolte, a beaucoup affecté l'épiaison et le remplissage des grains des plants du 2^e semis de toutes les variétés en 2003 (tableau XV). Ce tableau montre comment les poids de 1000 grains ont chuté avec le 2^e semis, pour les variétés HKP et ZATIB dont les plants étaient en fin de montaison début épiaison lors de l'arrêt des pluies. Quant à la variété MTDO, les plants d'aucune des deux

dates de semis n'ont été épargnés de l'effet négatif de cette sécheresse, du fait de son cycle plus tardif. Ce résultat montre qu'il n'y a pas eu un grand écart entre les dates d'épiaison des plants des deux semis de cette variété, du fait de sa photosensibilité.

En définitive, il ressort de cette étude que toutes les trois variétés ont réduit leur rendement grains avec le retard du semis. Le comportement particulier de la HKP en 2002, pourrait s'expliquer par l'épisode sec observé vers le 60^e JAS, qui a coïncidé avec la phases vulnérables du début épiaison des plants du 1^{er} semis de cette variété ; la seule à atteindre ce stade de développement en ce moment. Le stress hydrique aurait en effet diminué le taux d'épiaison des talles des plants du semis précoce de cette variété.

10.10.2. Rendements paille

En 2002, les rendements paille n'ont pas été significativement différents pour les deux dates de semis au seuil 5 %. Cependant, toutes les variétés ne se sont pas comportées de la même manière vis-à-vis du décalage du semis. En effet, les variétés ZATIB et la MTDO ont vu leurs rendements paille diminuer respectivement de 23 % et 11 %, au moment où celui de la HKP augmentait de 11 %, avec le retard du semis. Les rendements paille ont cependant été à la limite de la signification pour toutes les variétés (tableau XVI). Au niveau du 1^{er} semis, les variétés semi-tardive (ZATIB) et tardive (MTDO) ont produit des pailles significativement plus élevées que la HKP précoce. Au niveau des plants du 2^e semis, la HKP et la ZATIB ont eu la même production en paille, et ont été différentes toutes les deux de la MTDO dont la production a été significativement plus élevée. En 2003, les rendements paille n'ont pas significativement varié, aussi bien en fonction des variétés que des dates de semis (tableau XVI) ; de même que l'interaction entre les deux facteurs. Cependant, le tableau XVI montre que les rendements paille ont présenté pratiquement les mêmes tendances de variations que le rendement grains, aussi bien avec le décalage de la date de semis qu'avec les variétés. En effet, outre le cas exceptionnel de la HKP en 2002, les rendements paille de toutes les variétés ont été réduits avec le retard du semis. Ceci s'explique par la sensibilité du mil au décalage de la date de semis, donc à la photopériode, qui est d'autant plus grande que le cycle de la variété est long. Kouressy (2007) a fait le même constat sur le sorgho au Mali.

En 2003, la réduction du rendement paille a été plus importante, avec 37 % pour la HKP, 53 % pour la ZATIB et 69 % pour la MTDO, par rapport aux rendements obtenus avec le 1^{er} semis. Ceci s'explique par l'effet négatif de l'arrêt précoce des pluies ayant affecté les plants du 2^e semis à des degrés d'autant plus importants que le cycle de la variété est long.

Ainsi, outre la disponibilité en eau et en fertilisants dans le sol, le rendement paille dépend aussi de la capacité de la variété à produire plus de talles et à développer des tiges hautes et robustes. Dans cette étude, la variété MTDO a montré une aptitude à taller supérieure à celles

des autres variétés. Ceci confirme les résultats de Siband (1981) et de Amadou (1994) qui ont indiqué que, le nombre total des talles émises par un plant de mil est d'autant plus élevé que le cycle de la variété est long, tant que l'eau n'est pas un facteur limitant. Cependant, en ce qui concerne la ZATIB (semi-tardive), le fait qu'elle ait produit plus de paille que la HKP avec le semis précoce en 2002 et en 2003, ne s'explique pas par une production massive de talles, mais plutôt par des tiges plus grosses qu'elle développe. Ceci a été vérifié par un comptage du nombre de talles productives fait pour les deux variétés et qui a donné une moyenne de 4,43 tiges productives m² pour la HKP contre 3,42 pour la ZATIB. Avec le retard du semis, la HKP a toujours produit plus de paille que la ZATIB (tableau XVI), cela du fait qu'elle a eu, de par sa précocité, la capacité d'émettre plus rapidement un nombre assez important de talles qu'elle est susceptible de mobiliser pour une épiaison plus accélérée et plus effective que les autres variétés.

Ceci permet de conclure que la HKP a le meilleur avantage agronomique de concilier l'amélioration de l'indice de récolte avec la réduction du cycle induit par le retard du semis, donc des besoins en eau, dans le contexte des courtes saisons des pluies qui caractérisent le Sahel. Cependant, lorsqu'il s'agit d'un semis précoce, la ZATIB a été la plus rentable en grains dans nos conditions expérimentales. La MTDO tardive, et dont les besoins en eau sont plus élevés, intéresserait les agriculteurs de la zone soudano-sahélienne où la saison pluvieuse peut s'étaler sur 5 mois au moins. Elle peut aussi être conseillée aux paysans combinant l'agriculture à l'élevage et dont la production de pailles représente un intérêt particulier pour l'alimentation du bétail.

Tableau XIV : Rendements moyens (kg ha⁻¹) en grains des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis. Agrhymet, 2002 et 2003.

Année	Semis	Variétés			Moyenne
		HKP	ZATIB	MTDO	
2002	1 ^{er} date de semis	1430ab	1803a	1648a	1627
	2 ^e date de semis	1750a	1264ab	936b	1317
	Moyenne	1590	1534	1292	1472
2003	1 ^{er} date de semis	946ax	1324c	638dx	969
	2 ^e date de semis	389by	322dy	207dy	306
	Moyenne	668	823	423	638

Les résultats suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %.

Tableau XV : Poids sec moyen d'un épi et son rendement grains pour les variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis (*Pds = poids et moy = moyen*). Agrhymet, 2002 et 2003.

Année	Semis	Variétés								
		HKP			ZATIB			MTDO		
		Pds d'un épi (g)	Pds grains/épi (g)	Pds de 1000 grains (g)	Pds d'un épi (g)	Pds grains/épi (g)	Pds de 1000 grains (g)	Pds d'un épi (g)	Pds grains/épi (g)	Pds de 1000 grains (g)
2002	1 ^{ère} date de semis	50,8	33,4	-	74,5	47,7	-	67,9	40,9	-
	2 ^e date de semis	54,6	38,5	-	65,9	40,8	-	54,4	30,1	-
2003	1 ^{ère} date de semis	35,7	21,5	8,2	52,8	32,9	8,9	43,5	22,3	6,9
	2 ^e date de semis	25,8	13,0	6,4	32,3	17,0	6,7	31,7	14,4	6,4

Tableau XVI : Rendements moyens (kg ha⁻¹) en paille des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la date de semis. Agrhymet, 2002 et 2003.

Année	Date	Variété			Moyenne
		HKP	ZATIB	MTDO	
2002	1 ^{ère} date de semis	2544a	3343b	4733bc	3540
	2 ^e date de semis	2817a	2567ab	4216c	3200
	Moyenne	2680	2955	4475	3370
2003	1 ^{ère} date de semis	2910a	3133a	3326a	3262
	2 ^e date de semis	1840a	1458a	1160a	1486
	Moyenne	2375	2296	2451	2374

Les résultats suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %.

10.11. Effet de l'urée sur les rendements des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO

10.11.1. Rendements grains

Dans les conditions contrastées d'apport d'urée, les rendements grains ont été très différents en fonction des variétés, aussi bien en 2002 qu'en 2003 (tableau XVII). Cependant, excepté la ZATIB en 2003, l'apport d'urée n'a pas permis une augmentation significative des rendements grains des différentes variétés, durant toutes les deux saisons d'essais. Ceci s'explique par les tendances qui ont été inversées dans les variations des rendements grains des différentes variétés sous l'effet de l'urée ayant permis d'une part, l'augmentation de la production en grains de la HKP et de la ZATIB et d'autre part, la réduction de celle de la MTDO, par rapport au traitement témoin. Egalement, l'interaction entre l'urée et les comportements variétaux n'a pas été significative. La variété ZATIB a eu les meilleurs rendements grains durant toutes les deux saisons de tests, aussi bien en présence d'urée qu'en son absence. Elle a été suivie de la HKP, la MTDO étant la moins performante en production grains dans les conditions climatiques de notre site. Pourtant, selon la fiche technique consultée à l'Institut National de Recherche Agronomique du Niger (INRAN), la MTDO peut produire jusqu'à 2000 à 2500 kg ha⁻¹, dans les zones agroclimatiques mieux arrosées du pays. Ainsi, la faible performance qu'elle a connue dans notre test s'expliquerait essentiellement par la longueur de son cycle qui n'était pas bien adapté aux courtes saisons de pluies qui caractérisent notre site. En effet, dans notre site, elle a toujours été victime de l'arrêt définitif des pluies soit pendant la montaison, soit en début épiaison, ce qui a rendu ses plants fertilisés (dont la biomasse foliaire a été augmentée par l'urée) plus vulnérables au déficit hydrique qui en résultait. C'est ainsi qu'elle a donné en 2003 les faibles rendements grains de 431 kg ha⁻¹ avec le traitement nul d'urée et de 185 kg ha⁻¹ avec le traitement fertilisé, contre 783 kg ha⁻¹ et 743 kg ha⁻¹, respectivement pour les deux traitements en 2002. Ces chiffres montrent une nette diminution du rendement grains de cette variété dans les parcelles fertilisées, ce qui dénote l'effet négatif de l'urée dans ces conditions de culture où l'eau est un facteur très limitant.

Notons également, pour justifier l'impact du stress hydrique, que cette variété a eu les plus faibles valeurs en poids de mille grains, avec 6,33 g pour le traitement non fertilisé et seulement 4,97 g pour le traitement fertilisé en 2003. Les variétés HKP et ZATIB, dont les épis ont mûri avant le déficit hydrique, ont eu des poids de mille grains presque deux fois plus élevés que ceux donnés par la MTDO, pour tous les deux traitements d'urée. En effet, les mille grains de la HKP ont pesé 8,57 g en l'absence d'urée et 9,40 g en présence d'urée, contre 8,73 g en l'absence d'urée et jusqu'à 10,27 g en présence d'urée pour la variété ZATIB, pendant la même saison 2003. Ainsi, on peut dire que les grains de la ZATIB ont

pesé plus que ceux de la HKP et qu'en dehors de cette différence variétale, le remplissage a été augmenté par l'urée, pour toutes les deux variétés.

Ainsi, dans les conditions hydriques incertaines qui caractérisent le Sahel, il est important de retenir que l'apport d'urée n'est pas toujours la bonne technique de rehaussement du rendement grains du mil, en particulier chez les variétés tardives. Dans cette situation, seules les variétés précoces et semi-précoces peuvent répondre positivement à l'apport d'urée pour augmenter leurs rendements grains, dans l'espoir que le développement des plants ne sera pas affecté par l'impact d'épisodes secs. Seules ces variétés peuvent répondre au souci d'accroître la production du mil par l'intensification agricole, technique soutenue par les services de vulgarisation agricole, pour aboutir à la sécurité alimentaire des populations sahéliennes. Ainsi, du fait qu'elle a donné les meilleurs rendements grains pour un développement foliaire assez réduit, la variété ZATIB est mieux indiquée pour augmenter la production agricole dans les conditions de notre site.

10.11.2. Rendements paille

Les rendements paille ont été très significativement différents selon les variétés et les doses d'urée apportées, cela aussi bien en 2002 qu'en 2003. Cependant, l'interaction entre les deux facteurs n'a été significative qu'en 2003 (annexe 5). En effet, par rapport aux résultats donnés par le traitement témoin, l'apport d'urée avait augmenté les rendements pailles de 29 % pour la HKP, 39 % pour la ZATIB et 19 % pour la MTDO en 2002, contre 29 % pour la HKP, 33 % pour la ZATIB et jusqu'à 102 % pour la MTDO en 2003. Ceci permet de dire que l'urée a eu un effet très positif sur le développement végétatif des ces variétés de mil (tableau XVIII). Il ressort de ces chiffres que le développement végétatif a été constamment plus exubérant chez la variété tardive (MTDO), cela surtout en 2003 avec l'apport d'urée.

Quant à la HKP et la ZATIB, elles ont donné des rendements en paille non significativement différents entre eux. Cependant, la ZATIB a produit plus de paille que la HKP avec tous les traitements d'urée, pour toutes les deux années de test (tableau XVIII). Ce tableau montre aussi que les rendements paille obtenus en 2003 ont été plus élevés que ceux de 2002. Ceci est dû aux épisodes secs intra-saisonniers observés en 2002 et qui ont affecté le développement des plants des différentes variétés. Quant à la saison 2003, elle a été caractérisée par des pluies d'une répartition plus régulière dans le temps et d'une fin plus précoce qu'en 2002. Ceci a entraîné le déficit hydrique évoqué ci-dessus et qui n'a eu d'effet négatif que sur les rendements grains de la variété tardive MTDO ; les deux autres variétés ayant presque achevé leurs cycles en ce moment.

Tableau XVII : Rendements moyens (kg ha⁻¹) en grains des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la dose d'urée (N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹). Agrhymet, 2002 et 2003.

Année	Urée	Variétés			
		HKP	ZATIB	MTDO	Moyenne
2002	N0	1036a	1216a	783b	1012
	N1	1393a	1553a	747b	1231
	Moyenne	1214	1385	765	1121
2003	N0	827a	1036a	431b	764
	N1	1249ac	1593c	185b	1009
	Moyenne	1038	1314	308	887

Les résultats suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %.

Tableau XVIII : Rendements moyens (kg ha⁻¹) en paille des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO en fonction de la dose d'urée (N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹). Agrhymet, 2002 et 2003.

Année	Urée	Variétés			
		HKP	ZATIB	MTDO	Moyenne
2002	N0	1983a	2067a	3408c	2486
	N1	2550b	2875b	4050d	3158
	Moyenne	2267	2471	3729	2822
2003	N0	2569a	2625a	4257c	3150
	N1	3319a	3500a	8611d	5144
	Moyenne	2944	3063	6434	4147

Les résultats suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %.

10.12. Effet de l'urée et de la densité de semis sur les rendements de la variété de mil ZATIB

10.12.1. En conditions pluviales strictes

En conditions pluviales strictes, l'effet de la densité de semis n'a pas été significatif sur les rendements grains, aussi bien en 2002 qu'en 2003. Quant à l'effet de l'urée, il a été significatif en 2002, mais pas en 2003. Cependant, les rendements grains fournis par les parcelles fertilisées ont été plus élevés que ceux obtenus dans les parcelles non fertilisées (tableau XIX). Ce tableau montre également que, à l'exception du traitement N1xD2 qui a donné jusqu'à 1 463 kg ha⁻¹ en 2002, les meilleurs rendements en grains ont été toujours obtenus avec la faible densité de semis, aussi bien en présence qu'en l'absence d'urée. D'une manière générale, les rendements grains obtenus en 2003 avec les différents traitements, ont été inférieurs à ceux de 2002.

Ceci dénote une variabilité inter-saisonnière des rendements grains qui s'expliquerait par la variation de la fertilité initiale du sol. Cette instabilité jouerait sur la dose d'urée apportée comme traitement fertilisé, en diminuant ou en augmentant son effet sur les rendements de la culture. Ceci se remarque à travers les rendements grains obtenus dans notre test, qui ont été affectés par l'apport de la même dose d'urée, de façon significative en 2002, à l'image de ceux obtenus par Pandey *et al.*, (2001) et Diangar *et al.*, (2004), et non significative en 2003. En effet, l'apport d'urée a permis une nette augmentation des rendements de la variété ZATIB du mil, mais cela à des degrés différents selon les années d'expérimentation. Ceci s'illustre par le rendement grains qui a été meilleur en 2002 avec la forte densité de semis en présence d'urée (1 463 kg ha⁻¹), alors qu'avec la baisse de la fertilité du sol constatée en 2003, la même dose d'urée a été insuffisante pour permettre aux plants de cette forte densité de produire plus de grains que ceux de la faible densité. Outre la fertilité du sol, on note également l'impact de la variabilité intra et inter-saisonnière des pluies. En effet, la pluviométrie de 2003 (cumul de 531 mm), bien qu'elle ait été plus importante et régulière que celle de 2002 (cumul 485,5 mm), a connu un arrêt précoce qui permet d'expliquer la chute observée dans le rendement grains en 2003 par rapport à 2002.

L'effet de l'urée a été plus net sur les rendements en paille que sur ceux en grains. En effet, les rendements paille ont sensiblement augmenté avec l'apport de l'urée, pour toutes les densités de semis. L'analyse de la variance a montré une différence très significative entre les doses d'urée N0 et N1, aussi bien en 2002 qu'en 2003. Par contre, les deux densités de semis n'ont pas été significativement différentes durant les deux années d'expérimentation (tableau XIX). De même, l'interaction entre la densité de semis et l'apport d'urée n'a pas été significative. Les rendements en paille ont également connu une baisse importante en 2003

sous les différents traitements. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec les traitements N1xD2 en 2002 et N1xD1 en 2003. En l'absence d'apport d'urée, les plants de mil produisent plus de paille avec la faible densité de semis qu'avec la forte. Cependant, cette tendance peut être inversée, quand le sol est suffisamment riche, comme c'était le cas dans notre étude en 2002 et celle de Anonyme (1993).

10.12.2. En conditions irriguées

Dans les conditions d'irrigations complémentaires, l'urée a eu un effet hautement significatif sur les rendements grains de la variété ZATIB du mil, durant toutes les deux saisons d'expérimentation (tableau XX). Cependant, la densité de semis n'a pas eu d'effet significatif. Quant à l'interaction entre l'urée et la densité de semis, elle a été presque significative au seuil de 5 % en 2002. Ceci, est dû au fait que les irrigations complémentaires ont permis une augmentation du rendement grains avec l'augmentation de la densité de semis dans les parcelles fertilisées en urée. Les mêmes tendances ont été observées en 2003 (tableau XX).

Au niveau des parcelles non fertilisées, la forte densité de semis a donné un rendement grains légèrement plus élevé que celui de la faible densité en 2003. Les tableaux XIX et XX montrent qu'en l'absence d'urée, la faible densité de semis a donné un rendement grains plus élevé en conditions pluviales strictes qu'en conditions d'irrigations complémentaires, aussi bien en 2002 qu'en 2003. Pour le traitement non fertilisé associé la forte densité de semis, c'est une tendance inverse qui a été observée, avec des rendements grains plus élevés en irrigué qu'en pluvial, cela du fait probablement de l'hétérogénéité de la fertilité initiale du sol comme l'ont souligné Craufurd et Bidinger, (1989). En conditions irriguées, excepté le traitement non fertilisé de la faible densité de semis, le rendement grains d'aucun des traitements n'a connu de baisse de 2002 à 2003, contrairement aux résultats obtenus en conditions pluviales strictes (tableaux XIX et XX). Ces tableaux montrent qu'à part le traitement N0xD2 en pluvial, tous les traitements non fertilisés des deux régimes hydriques ont donné presque les mêmes rendements grains en 2003.

Ces variations, font ressortir un effet de la densité de semis plus prononcé en conditions pluviales strictes qu'en conditions irriguées, cela du fait non seulement de l'insuffisance hydrique, mais aussi de la baisse de la fertilité du sol en pluvial. En effet, la dose d'urée (100 kg ha⁻¹) apportée aurait été très insuffisante pour permettre au mil ZATIB d'atteindre ses potentialités de production, avec le régime hydrique pluvial strict et avec celui optimisé par les irrigations complémentaires où cette variété aurait pu donner des rendements grains encore plus élevés avec la satisfaction de ses besoins en eau. Ceci permet de réitérer que les insuffisances en eau et en fertilité azotée du sol ont été les principales raisons de la baisse de la productivité de cette variété, aussi bien en fonction des traitements que de l'année de

culture en pluvial. Ceci se justifie par les résultats obtenus dans les parcelles irriguées ayant montré que l'apport d'urée a augmenté les rendements grains de la variété avec la forte densité de semis, pendant que son non apport anéantissait l'effet des irrigations complémentaires dans les parcelles témoins.

Les rendements en paille ont varié dans le même sens que ceux en grains, selon les traitements et l'année d'expérimentation (tableau XX). Le plus fort rendement paille a été donné, durant toutes les deux années d'expérimentation, par les parcelles fertilisées de la forte densité de semis, avec des moyennes de 2 900 kg ha⁻¹ en 2002 et de 3 076 kg ha⁻¹ en 2003. Les plus faibles rendements paille ont été observés au niveau des traitements non fertilisés de la forte densité de semis en 2002 et de la faible densité en 2003. Ceci est dû au tallage des plants qui a été compromis par la pauvreté du sol dans les parcelles non fertilisées, en dépit de la satisfaction des besoins hydriques par les irrigations complémentaires. En effet, les sols pauvres réduisent le développement potentiel du mil, donc son rendement paille constitué principalement des seuls brins maîtres. Ceci expliquerait les rendements en paille plus élevés de la forte densité de semis qui a plus de plants dans la parcelle élémentaire.

Tableau XIX : Rendements en grains et en paille (kg ha⁻¹) de la variété de mil ZATIB en fonction de la dose d'urée (N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹) et de la densité de semis (D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹), dans des conditions hydriques pluviales. Agrhymet, 2002 et 2003.

	Année	Urée	Densité		
			D1	D2	Moyenne
Grains	2002	N0	1088a	699c	894
		N1	1243ab	1463b	1353
		Moyenne	1165	1081	1123
	2003	N0	856ab	553b	704
		N1	1134a	1039a	1086
		Moyenne	995	796	895
Paille	2002	N0	1867ab	1441a	1654
		N1	2317ab	2352b	2335
		Moyenne	2092	1897	1994
	2003	N0	1628ab	1276b	1452
		N1	2295a	2005a	2150
		Moyenne	1962	1641	1801

Les résultats suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %.

Tableau XX : Rendements moyens (kg ha⁻¹) en grains et paille de la ZATIB en fonction de la dose d'urée (N0 = 0 kg ha⁻¹ et N1 = 100 kg ha⁻¹) et de la densité de semis (D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹), en conditions d'irrigations complémentaires. Agrhymet, 2002 et 2003.

	Année	Urée	Densité		
			D1	D2	Moyenne
Grains	2002	N0	960a	812a	886
		N1	1278b	1459b	1368
		Moyenne	1119	1135	1127
	2003	N0	798a	811a	805
		N1	1330b	1422b	1376
		Moyenne	1064	1117	1091
Paille	2002	N0	2167a	1716a	1941
		N1	2782b	2900b	2841b
		Moyenne	2475	2308	2391
	2003	N0	1807a	1826a	1816
		N1	2687b	3076b	2882
		Moyenne	2247	2451	2349

Les résultats suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %.

10.13. Effet de l'urée et de la densité de semis sur l'efficacité d'utilisation d'eau par la variété de mil ZATIB

Sous le régime hydrique pluvial strict, la variété ZATIB a donné les meilleures efficacités (plus de 3 kg ha⁻¹ de grains pour 1 mm d'eau consommée) avec la faible densité de semis, associée ou non à l'apport d'urée (tableau XXI). Dans ces conditions hydriques, les plus faibles efficacités ont été obtenues avec la forte densité de semis, et cela surtout en l'absence d'apport d'urée. On note cependant qu'en 2002, le traitement fertilisé de la forte densité de semis a eu l'efficacité d'utilisation d'eau la plus élevée (4,5 kg mm⁻¹ ha⁻¹), en pluvial. Ceci est dû au fait que les plants de ce traitement avaient initialement un développement exubérant, mais suite aux épisodes de sécheresse qui ont eu lieu pendant la 1^{ère} et la 3^e décennie du mois de septembre 2002, on a assisté à un dessèchement de leurs tiges les moins développées. Avec la reprise des pluies pendant le mois d'octobre, leurs besoins en eau se trouvaient relativement plus diminués que ceux des plants des autres traitements. Avec la poursuite des conditions hydriques favorables jusqu'à la 2^e décennie d'octobre, ce traitement a eu le potentiel productif le plus élevé, du fait du plus grand nombre de plants dans les parcelles. Notons cependant que cette situation est assez rare dans les conditions de notre site de culture à Niamey. En effet, sur la période 1971-2000 la probabilité d'avoir un cumul pluviométrique supérieur à 10 mm n'était que de 15,6 % aussi bien en 1^{ère} qu'en 2^e décennie d'octobre. Alors qu'en 2002, on avait recueilli 37,9 et 15,6 mm respectivement pendant les deux premières décennies de ce mois.

Par ailleurs, on constate que les efficacités obtenues dans les conditions pluviales en 2002 avec les traitements fertilisé et non fertilisé de la forte densité de semis ont connu une baisse importante en 2003, du fait de la diminution de la fertilité du sol (tableau XXI). Ce tableau présente aussi des efficacités d'utilisation d'eau plus élevées avec l'amélioration des conditions hydriques par des irrigations complémentaires, pour la même variété et les mêmes traitements d'urée et de densité de semis. Ces efficacités ont été obtenues en 2003 et montrent qu'il est bien possible d'augmenter la production du mil par un apport d'urée associé à des densités de semis relativement fortes, tant que l'eau est disponible.

Tableau XXI : Consommation hydrique, rendement grain et efficacité d'utilisation de l'eau de la variété de mil ZATIB, en fonction de la dose d'urée ($N0 = 0 \text{ kg ha}^{-1}$ et $N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$) et de la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$). Agrhymet, 2002 et 2003.

Régime hydrique/Année	Traitement	ETR cumulée (mm)	Rendement grain (kg ha^{-1})	Efficacité ($\text{kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)
Pluvial / 2002	N0D1	357	1088a	3,0
	N1D1	332	1243ab	3,7
	N0D2	307	699c	2,3
	N1D2	321	1463b	4,5
Pluvial / 2003	N0D1	277	856ab	3,1
	N1D1	357	1134a	3,2
	N0D2	310	553b	1,8
	N1D2	367	1039a	2,8
Irrigué / 2003	N0D1	356	798a	2,2
	N1D1	386	1330b	3,4
	N0D2	347	811a	2,3
	N1D2	376	1422b	3,8

10.14. Conclusion partielle

En guise de synthèse, il ressort que les saisons 2002 et 2003 ont été caractérisées par des régimes pluviométriques très contrastés. En 2002, les plants ont bénéficié des pluies tardives recueillies en octobre, après qu'ils aient vécu plusieurs épisodes secs intra saisonniers. Quant à la saison 2003, elle n'a pas connu de déficit hydrique intra saisonnier important, mais a connu un arrêt précoce des pluies (en mi-septembre) et une baisse généralisée de la fertilité résiduelle du sol qui ont négativement affecté la croissance et les rendements des variétés.

Dans cette situation caractéristique du Sahel, les résultats obtenus ont montré que toutes les trois variétés de mil testées sont sensibles à la photopériode, avec la MTDO ayant été plus photosensible. L'effet de la photopériode sur la croissance des variétés a été observé seulement pendant la phase phénologique du tallage et, dans une moindre mesure pendant celle de la montaison. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Vaksman *et al.*, 1996 sur le sorgho au Mali. Bien que photosensible, la variété précoce HKP a eu des performances meilleures avec le semis tardif qu'avec celui précoce, en 2002. Ceci est un comportement particulier dont l'explication la plus probable serait liée à l'impact des déficits hydriques vécus cette année et qui ont plus affecté les plants du semis précoce de cette variété. En définitive, il s'est avéré que la variété HKP a le meilleur avantage agronomique de concilier l'amélioration de l'indice de récolte avec la réduction du cycle induit par le retard du semis, dans le contexte des courtes saisons des pluies qui caractérisent le Sahel. Cependant, lorsqu'il s'agit d'un semis précoce, la ZATIB est la plus performante en rendement grains. Quant à la MTDO tardive, elle réussirait mieux en zone soudano-sahélienne où la saison pluvieuse peut s'étaler sur 5 mois au moins.

S'agissant de l'apport d'urée, il est évident qu'il soit favorable à l'accroissement des composantes du rendement du mil, en l'absence de stress hydrique. Cependant, avec l'irrégularité des pluies, nos résultats ont montré l'importance de combiner l'apport d'urée à un choix variétal. En effet, bien que potentiellement plus productives, les variétés à cycle long (ZATIB et MTDO) sont les plus exposées aux épisodes secs, assez fréquents au Sahel pendant les phases critiques d'épiaison et de floraison. En effet, l'apport d'urée a un effet négatif sur les variétés exposées au risque de déficit hydrique au cours de leur croissance. Tout de même, il est ressorti que la variété ZATIB donne les meilleurs rendements grains, aussi bien en présence d'urée qu'en son absence. Elle a été suivie de la HKP, la MTDO étant la moins performante en production grains dans les conditions climatiques de notre site. Ainsi, seules les variétés précoces et semi-précoces peuvent répondre positivement à l'apport d'urée, pour augmenter leurs rendements grains et permettre la sécurité alimentaire des populations sahéliennes.

Quant à la densité de semis, elle n'a d'effet notable sur les rendements de la variété ZATIB que sur un sol pauvre et/ou mal arrosé. Ceci a été justifié par l'effet très significatif qu'a eu l'apport des 100 kg ha⁻¹ d'urée, en rehaussant la production de la variété en conditions pluviales et encore mieux dans les parcelles irriguées. Cependant, les apports complémentaires d'eau, n'ont pas empêché les rendements de cette variété de chuter sous l'impact de la pauvreté du sol ; un phénomène récurrent dans le milieu paysan sahélien où la dégradation continue des terres et la mauvaise répartition des pluies constituent les principaux facteurs limitants de la production agricole. L'insuffisance des pluies est un problème climatique très complexe et difficile à résoudre à court et moyen termes. L'impact négatif du fléau de la dégradation des sols sur la productivité des cultures peut, quant à lui, être amoindri par des investigations appropriées orientées vers la détermination de techniques agricoles plus adaptées et répondant mieux aux caprices des précipitations dans le Sahel. Les résultats de ce travail constitueraient une ébauche de réponse à cette problématique qui mine le système agricole au Sahel, dans la mesure où ils ont montré qu'une faible densité de semis associée à un apport modéré d'urée est la plus favorable à l'augmentation des rendements de la variété testée, dans des conditions hydriques incertaines. Si l'eau est disponible, il est cependant envisageable d'apporter des doses d'urée plus élevées que 100 kg ha⁻¹ pour accroître la production du mil avec une densité de semis relativement forte. Ainsi, il est judicieux de penser à augmenter la production agricole au Sahel, à travers l'optimisation de l'interaction entre la fertilisation azotée et la densité de semis, une voie sûre pour aboutir à une meilleure efficacité d'utilisation d'eau par la culture. Ceci montre l'intérêt que présente cette étude pour tenir compte de la disponibilité en eau dans le choix des pratiques culturales pour une augmentation de la production du mil au Sahel. En effet, comme attesté par les variations d'ETR observées, l'apport d'urée, associé à l'augmentation de la densité de semis, accroît la consommation hydrique du fait qu'il favorise la croissance végétative lorsque les conditions hydriques ne sont pas limitantes. Cependant, au vu des bonnes efficacités d'utilisation de l'eau observées en 2002 avec les traitements intensifiés ayant subi un déficit hydrique pendant la période végétative en pluvial, il y a lieu de poursuivre cette étude en contrôlant la disponibilité en eau aux différents stades de développement de la culture sous les mêmes traitements de densité de semis et d'apport d'urée. Ceci permettrait de relativiser l'avantage apparent qu'ont eu ces traitements après une reprise inespérée des pluies en fin de saison.

Chapitre 11 : Expérimentations à Bambey

Il est important de rappeler que l'essai de Bambey a été envisagé, afin d'utiliser les équipements d'irrigation performants dont dispose le CERAAS pour tester la variété de mil ZATIB par rapport aux mêmes densités de semis qu'au CRA, mais associées à différents régimes hydriques dans des conditions de fertilité du sol non limitantes. Il a aussi permis d'utiliser d'autres outils ou appareils, non disponibles au CRA, pour mesurer certains paramètres importants pour le calibrage du modèle SARRA-H. L'idéal était de réaliser les mesures pour les trois variétés de mil expérimentées au CRA, mais compte-tenu de l'ampleur du travail et de la limitation des moyens financiers, seule la variété ZATIB (à cycle intermédiaire entre ceux de la HKP et de la MTDO) a été utilisée.

11.1 Croissance et développement de la culture

11.1.1. Accumulation de biomasse aérienne

Dans les conditions de fertilité optimale du sol, la matière sèche des feuilles de la variété de mil ZATIB a varié significativement en fonction du régime hydrique : régimes ETM et S1, entre les 600 et 800 degrés jour et régimes ETM et S2, après les 800 degrés jour (figure 83). Cette figure montre que l'effet de la densité de semis a été significatif sur l'accumulation de biomasse foliaire, essentiellement sous les régimes hydriques ETM (vers les 600 degrés jour) et S1 (après les 800 degrés jour). En effet, pour un même régime hydrique, la matière sèche des feuilles a été plus élevée avec la faible densité de semis qu'avec la forte, du 45^e JAS (600 degrés jours) jusqu'à la récolte (figure 83). Ceci s'expliquerait par l'importance de la surface foliaire qui a été assez élevée dans les parcelles à forte densité de semis pour inhiber l'émission des jeunes talles, donc le développement foliaire, comme l'ont démontré Azam-Ali *et al.*, (1984). En effet, lorsque la biomasse foliaire est abondante, la captation du rayonnement solaire se limite essentiellement aux feuilles plus exposées de la couche supérieure de la canopée, ce qui empêcherait celles couvertes de la couche sous-jacente de bénéficier suffisamment de la lumière pour leur développement. Ceci diminuerait considérablement les dimensions et le nombre de feuilles sur les plants de la forte densité de semis chez lesquels la photosynthèse globale serait ainsi plus réduite que chez ceux de la faible densité.

Le régime hydrique a largement influencé l'accumulation de la matière sèche foliaire, en permettant aux plants mis en conditions hydriques non limitantes (ETM) d'être plus productifs en feuilles que ceux soumis aux stress hydriques, tout comme l'ont signalé Diouf *et al.*, (2004). Le stress hydrique (S2) appliqué tardivement pendant l'épiaison a plus diminué la matière sèche foliaire vers la fin du cycle que celui (S1) appliqué pendant la montaison. Ceci

s'explique par le fait que la levée du stress S1, appliqué à un stade de développement moins avancé de la culture, a permis aux plants de reprendre leur croissance en émettant de nouvelles feuilles qui ont en plus été moins sensibles à la sénescence que sous les autres régimes hydriques. L'effet du stress S2 a été plus important, parce que celui-ci a été appliqué pendant l'épiaison, favorisant ainsi la perte irréversible de feuilles avec le vieillissement des plants. Ceci, selon Somé (1990) et Kaushik et Gautam, (1994), conduit souvent à une baisse remarquable de la production de la culture.

Les mêmes tendances ont été observées dans l'évolution de la matière sèche des tiges, vis-à-vis de l'effet du régime hydrique (figure 84). Cette figure montre que la densité de semis n'a pas eu d'effet significatif sur l'évolution de la matière sèche des tiges. Toutefois, le stress hydrique (S2) a eu un effet plus marqué sur les plants de la forte densité de semis vers les 63^e JAS (800 degrés jours). En effet, les plants de ce traitement ont été les plus affectés par le déficit hydrique en perdant plus de tiges que ceux de la faible densité de semis. Ceci montre l'intérêt que présente l'espacement des plants pour la culture du mil, essentiellement cultivée dans des zones agro-climatiques peu pluvieuses.

Quant à la production en épis, elle a été également plus dépendante du régime hydrique que de la densité de semis (figure 85). En effet, il n'y a pas eu d'écart significatif entre les poids secs des épis issus des deux densités de semis, aussi bien en condition d'ETM que sous le stress hydrique S1. Cependant, le stress S2 a fait baisser la matière sèche des épis dans les parcelles à forte densité de semis. Quant à l'effet du régime hydrique, il a été particulièrement significatif (à la dernière observation faite à la maturité) sur les plants soumis au stress S2, par rapport à ceux soumis au stress S1 et dont la production en épis a été statistiquement la même que celle obtenue sous le régime hydrique ETM (figure 85). En effet, cette figure montre que le régime hydrique ETM a permis une production en épis, à la fois meilleure que celles obtenues sous les régimes stressants et identique pour les deux densités de semis. Ceci montre que l'effet négatif des stress hydriques, survenant pendant la période de reproduction, pourrait être atténué par une densité de semis modérée. La figure 86 montre que les poids secs des grains ont logiquement évolué dans le même sens que les poids des épis. Ils ont été plus bas avec la forte densité de semis, aussi bien sous le régime hydrique S1 que sous celui S2. Ceci explique le fait que les stress hydriques assez fréquents vers la fin des saisons au Sahel, soient majoritairement à la base des déficits alimentaires récurrents dans cette zone (Coulibaly *et al.*, 1988).

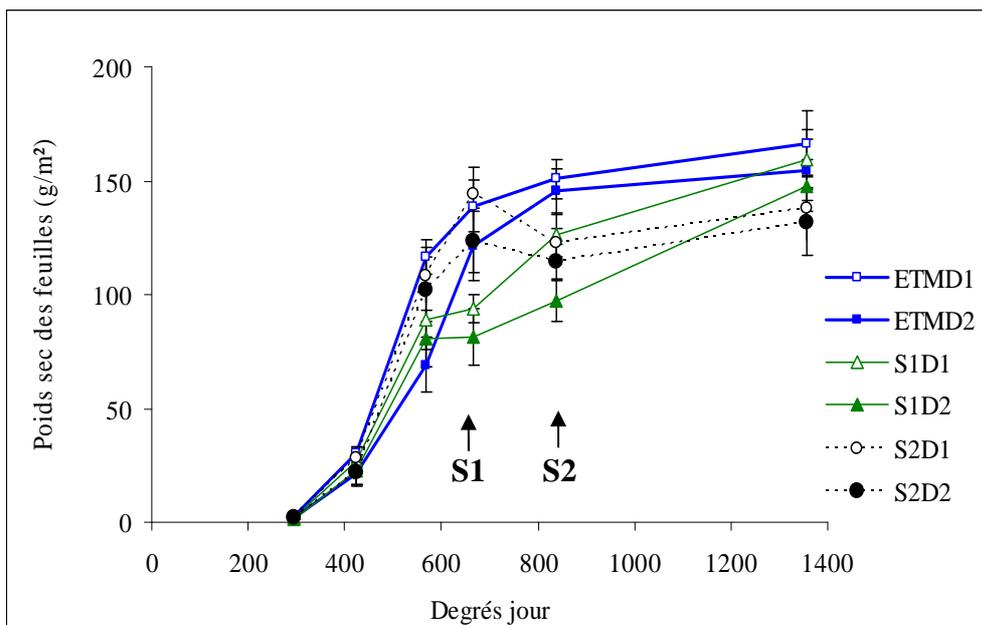


Figure 83 : Evolution de la matière sèche des feuilles de la variété de mil ZATIB sous l’impact de 3 régimes hydriques (*ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l’épiaison*) associés à 2 densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d’erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.

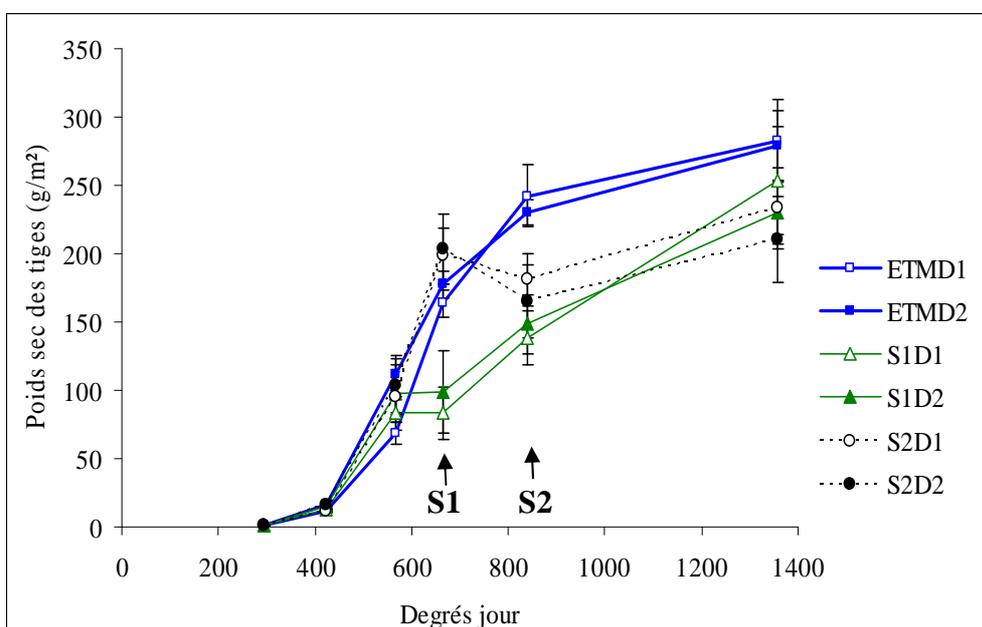


Figure 84 : Evolution de la matière sèche des tiges de la variété de mil ZATIB sous l’impact de 3 régimes hydriques (*ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l’épiaison*) associés à 2 densités de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d’erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.

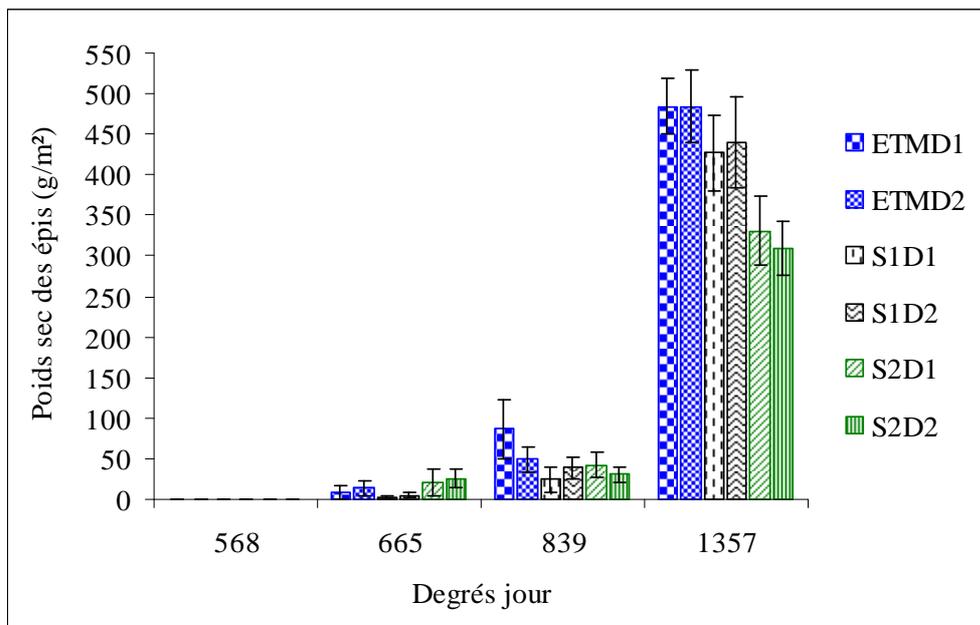


Figure 85 : Evolution de la matière sèche des épis de la variété de mil ZATIB sous l’impact de 3 régimes hydriques (*ETM* = évapotranspiration maximale, *S1* = stress pendant la montaison et *S2* = stress pendant l’épiaison) associés à 2 densités de semis (*D1* = 16666 plants ha⁻¹ et *D2* = 31250 plants ha⁻¹), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d’erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.

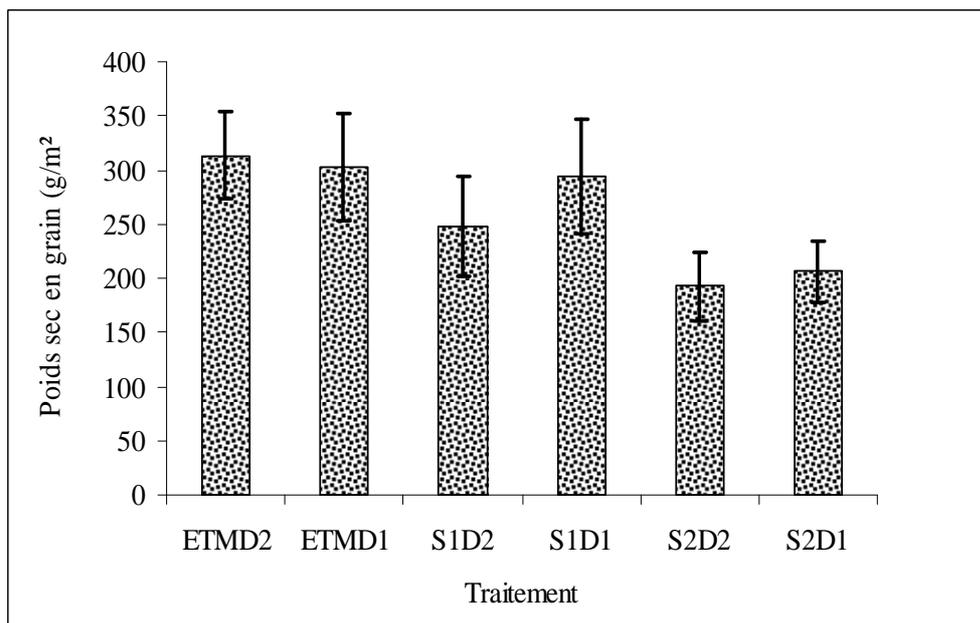


Figure 86 : Production en grains de la variété de mil ZATIB sous l’impact de 3 régimes hydriques (*ETM* = évapotranspiration maximale, *S1* = stress pendant la montaison et *S2* = stress pendant l’épiaison) associés à 2 densités de semis (*D1* = 16666 plants ha⁻¹ et *D2* = 31250 plants ha⁻¹), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d’erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.

11.1.2. Développement de la surface foliaire

Deux méthodes de mesures (planimètre et LAI-mètre) ont été utilisées pour évaluer le LAI de la variété de mil ZATIB, sous les impacts du régime hydrique et de la densité de semis. Ces deux méthodes sont comparables, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 91 \%$ (figure 87). Cette similitude des résultats des deux types de mesures permet de dire que le LAI-mètre (LAI-2000) est l'outil le plus approprié qu'il faudrait utiliser pour la mesure du LAI ; du fait qu'il permet, non seulement d'économiser le temps de travail, l'effort physique et la main d'œuvre, mais aussi d'éviter la destruction de la culture pour mieux bénéficier de ses rendements, contrairement à l'autre méthode utilisant le planimètre.

Les résultats montrent que le LAI a varié significativement avec le régime hydrique (figure 88). Il a été constamment plus élevé chez les plants cultivés en conditions hydriques ETM, avec des valeurs maximales de l'ordre de 2,5 obtenues vers le 63^e JAS pour un cumul thermique d'environ 850 degrés jours. Cependant, il a connu des baisses importantes avec les stress hydriques S1 et S2 appliqués respectivement en pleine croissance végétative (montaison) et en début épiaison. La même figure 88 montre que, vers les 600 degrés jours, le LAI a été de l'ordre de 0,7 sous l'effet du stress hydrique S1, contre environ 1,7 sous le régime hydrique ETM. Toutefois, la reprise des irrigations a permis aux plants issus de ce stress S1 de reprendre le développement de leur LAI mieux que ceux du stress S2. Ceci, parce que ces derniers étaient à la fin de la croissance végétative où la sénescence des feuilles commence à devenir importante, non pas seulement à cause de l'impact du déficit hydrique, mais aussi à cause du vieillissement des plants.

L'effet de la densité de semis n'a été significatif que chez les plants en ETM, entre 500 et 700 degrés jour et vers la fin du cycle (figure 88). La demande évaporative étant très élevée en contre-saison, les plants stressés des deux densités de semis ont répondu presque de la même manière au déficit hydrique, cela surtout avec le stress S1. Avec le stress S2, les plants de la forte densité de semis ont eu tendance à conserver plus de LAI que ceux de la faible densité en début de la suspension de l'irrigation. Ceci, du fait que les conditions hydriques (ETM), dans lesquelles étaient auparavant les plants de ce traitement, ont permis à la forte densité de semis d'être plus favorable à l'augmentation du LAI que la faible. Cependant, avec la levée du déficit hydrique (S2), le LAI a légèrement augmenté dans les parcelles à faible densité de semis, pour égaler celui obtenu avec la forte densité. Ceci montre que le déficit hydrique a eu plus d'impact sur les plants densément semés que sur ceux plus espacés chez lesquels la récupération a été plus rapide.

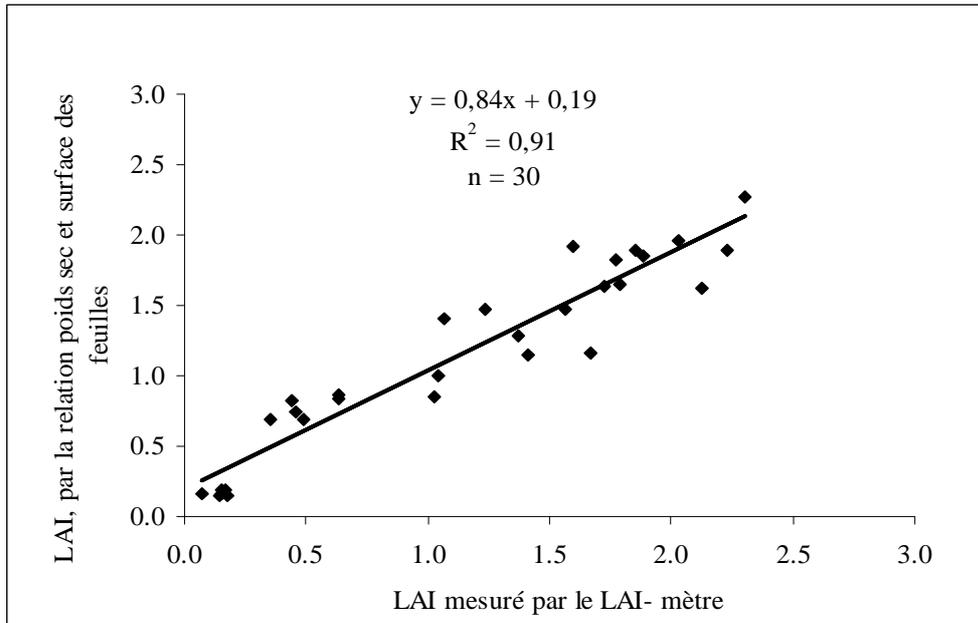


Figure 87 : Corrélation entre les résultats de deux méthodes de mesure du LAI de la variété de mil ZATIB : la méthode combinant la mesure de la surface (au planimètre Delta-T MK2 type AMS) et du poids sec des feuilles, et la méthode du LAI-mètre (LAI 2000, plant canopy analyser Li-cor). Bambey, 2004.

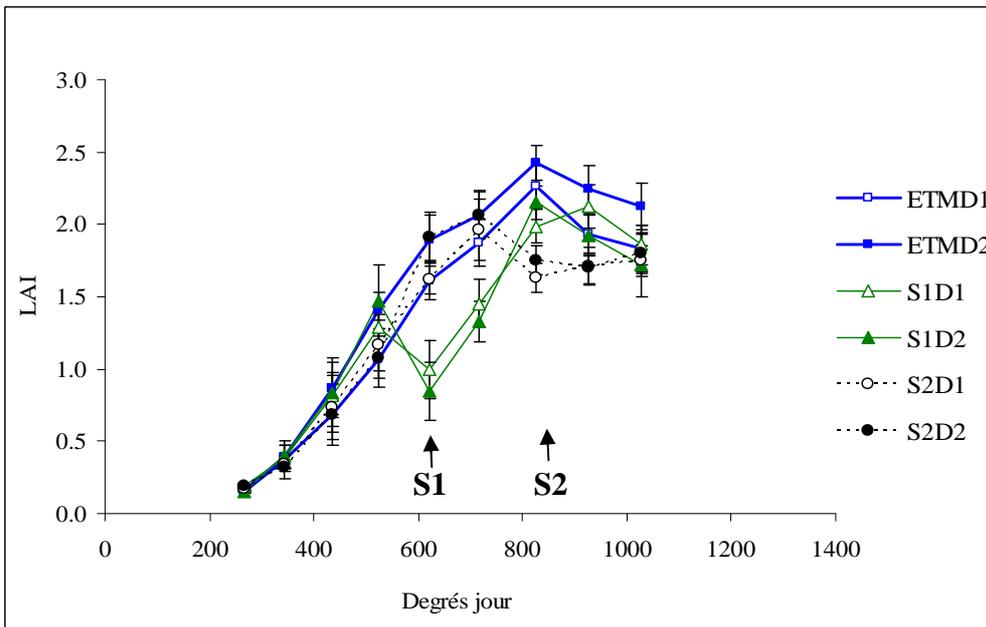


Figure 88 : Indice de surface foliaire (LAI) évalué par LAI-mètre (LAI 2000, plant canopy analyser Li-cor) pour la variété de mil ZATIB soumise à 3 régimes hydriques (*ETM* = évapotranspiration maximale, *S1* = stress pendant la montaison et *S2* = stress pendant l'épiaison) associés à 2 densités de semis (*D1* = 16666 plants ha^{-1} et *D2* = 31250 plants ha^{-1}), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.

11.1.3. Conductance foliaire et transpiration

La conductance stomatique de la variété ZATIB de mil a beaucoup fluctué en fonction de l'état hydrique du sol (figure 89). Elle a été élevée pour les mesures faites après une irrigation et faible pendant les jours de sécheresse. La figure 89 montre que la conductance stomatique a connu une baisse générale, même en condition hydrique ETM, jusqu'au 45^e JAS. Elle a été presque nulle après deux semaines de déficit hydrique pour le stress S1 et au bout d'une semaine seulement pour le stress S2 appliqué pendant la phase critique de l'épiaison-floraison. Cependant, ce comportement n'a été observé qu'en contre-saison (demande évaporative élevée à cause des vents chauds et secs), la variété pourrait résister un peu plus longtemps à ces genres de stress hydriques sous les conditions d'humidité relative plus élevée en saison des pluies.

L'effet de la densité de semis a été très peu marqué pendant les jours humides, mais pendant les jours secs, la conductance a été constamment plus faible chez les plants de la forte densité de semis que chez ceux de la faible. Ceci montre que les plants densément semés épuisaient plus vite l'eau qui leur a été apportée à la même quantité que ceux de la faible densité de semis ; d'où l'importance de la prise en compte du peuplement des plants dans la parcelle pour mieux prévenir les éventuels déficits hydriques pendant le cycle de la culture.

Les variations de la transpiration foliaire ont évolué dans le même sens que celles de la conductance stomatique (figure 90). En effet, la transpiration a lieu lorsque les stomates des feuilles s'ouvrent pour absorber le CO₂ pour la photosynthèse (Traoré, 1999). Ce processus, qui dépend de l'état hydrique de la culture, est aussi sous l'influence de la demande évaporative et de la radiation interceptée (Whitehead *et al.*, 1981 ; Avissar *et al.*, 1985). La répartition de cette dernière dans le couvert dépend à son tour de la densité de semis, donc du profil de la surface foliaire et de l'architecture de la végétation, définie par l'inclinaison des feuilles (Begué 1991). L'augmentation de la densité de semis, associée à un stress hydrique, accentue la résistance stomatique et baisse l'efficacité de la transformation de la radiation absorbée et le taux de transpiration de la culture (Ong et Monteith, 1984 ; Denden et Lemeur, 2000). Wallace *et al.*, (1990) ont déterminé pour le mil, à Sadoré au Niger, une conductance stomatique élevée de 480 mmol m⁻² s⁻¹, en conditions d'alimentation hydrique optimale. Cette valeur est plus élevée que celles obtenues pour la variété ZATIB de la même culture, en contre-saison à Bambey au Sénégal (figure 89). Cependant, ces auteurs ont abouti aux mêmes conclusions, en indiquant que la conductance stomatique varie avec la densité du feuillage, après que Hensen *et al.*, (1982) aient déjà souligné qu'en cas de forte densité de semis où les feuilles des différents plants s'entre-cachent, les plus hautes valeurs de conductance sont enregistrées au niveau des feuilles supérieures.

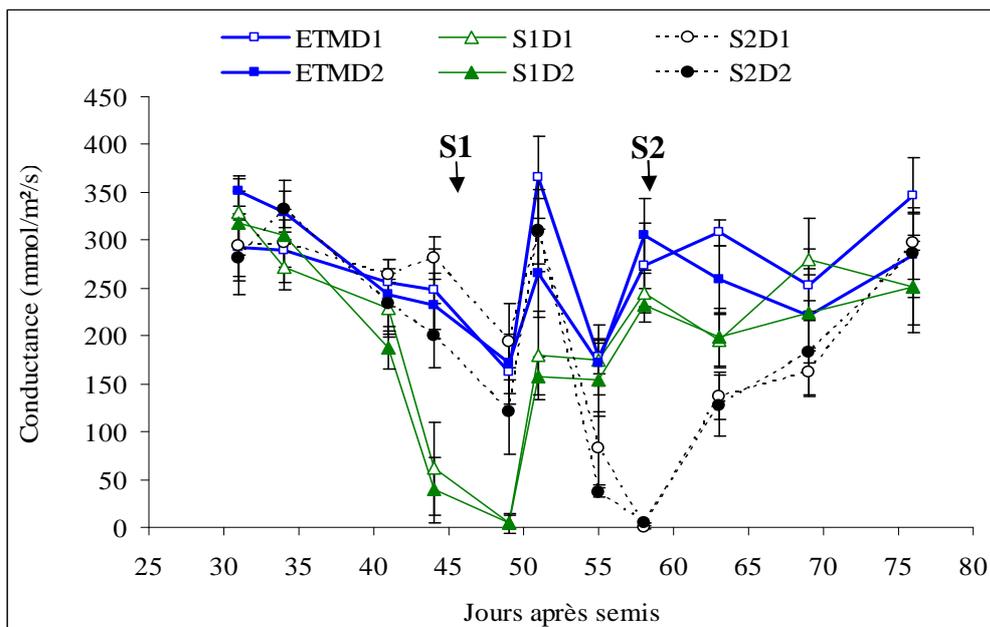


Figure 89 : Effet de 3 régimes hydriques (*ETM* = évapotranspiration maximale, *S1* = stress pendant la montaison et *S2* = stress pendant l'épiaison) associés à 2 densités de semis (*D1* = 16666 plants ha⁻¹ et *D2* = 31250 plants ha⁻¹) sur la conductance stomatique de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.

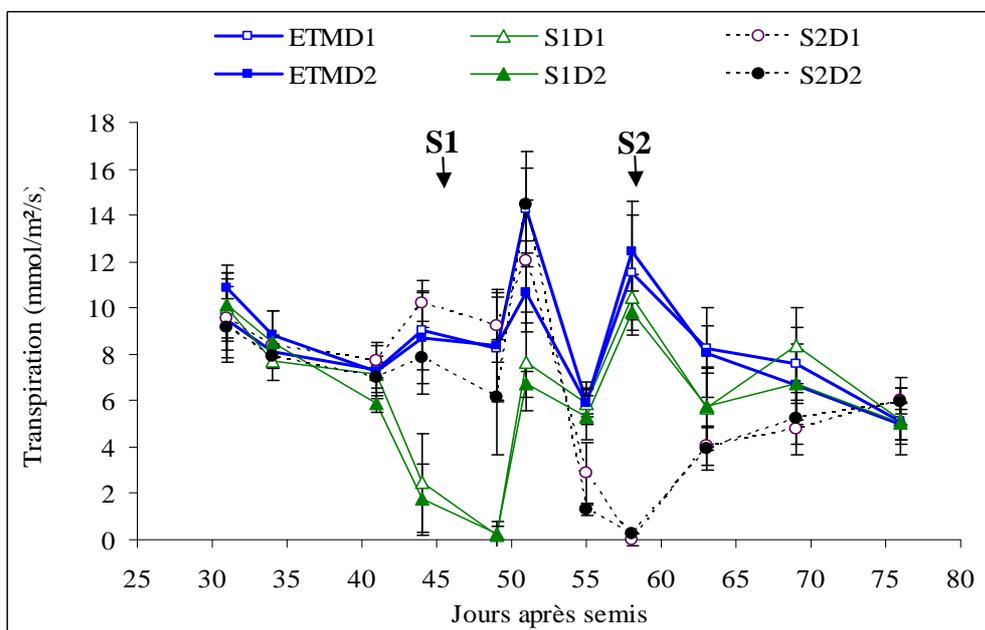


Figure 90 : Effet de 3 régimes hydriques (*ETM* = évapotranspiration maximale, *S1* = stress pendant la montaison et *S2* = stress pendant l'épiaison) associés à 2 densités de semis (*D1* = 16666 plants ha⁻¹ et *D2* = 31250 plants ha⁻¹) sur la transpiration foliaire de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.

11.1.4. Température du couvert

La densité de semis a eu un effet non significatif sur la température du couvert, aussi bien pendant les périodes de déficit hydrique S1 et S2 que pendant le régime hydrique ETM (figure 91). Toutefois, cette figure montre que la forte densité de semis a provoqué une légère (non significative) augmentation de la température de la canopée, pendant les périodes de stress hydrique. Ceci est certainement dû au fait que l'aération est plus réduite avec l'abondance de la biomasse végétative dans les parcelles à forte densité de semis. La température du couvert a été surtout dépendante du régime hydrique (figure 91). Cette figure montre que sous le régime hydrique ETM, la température a varié entre 28 et 33 °C, pour tous les traitements de densité de semis et durant tout le cycle de la variété. Cependant, elle a connu une augmentation très significative au cours des stress hydriques S1 et S2 (avec un pic de 38 °C pendant chaque stress). Cette augmentation thermique serait due à la diminution de la transpiration observée pendant ces régimes stressants et qui aurait réchauffé la température du couvert de 8 °C environ, par rapport à la moyenne observée en situation hydrique normale. Ceci confirme les propos de Traoré (1999) selon lesquels les stress hydriques prolongés réduisent la transpiration par manque d'eau et augmentent en conséquence la température foliaire. En effet, les plantes en transpiration ont généralement une température foliaire moins élevée par rapport à celle de l'air ambiant ; ce qui a amené cet auteur à considérer la température foliaire comme un indicateur de stress aussi bien thermique qu'hydrique.

Selon Santens (1985) et Diop (1999), les températures optimales du couvert qui permettent au mil de mieux répondre à la photosynthèse, dans des conditions hydriques suffisantes, sont de l'ordre de 30 à 35 °C. Ainsi, les valeurs thermiques élevées (de l'ordre de 35 à 38 °C) observées sous l'impact des déficits hydriques, inhiberaient considérablement la photosynthèse des plants stressés. En effet, ces derniers ont connu un flétrissement extrême, avec la persistance des stress hydriques auxquels ils ont été soumis dans cette situation de demande évaporative élevée en contre-saison (Bacci, 1994). Le rayonnement solaire intense qui caractérise le Sahel, particulièrement en contre-saison (Lawson et Sivakumar, 1991), a sans doute contribué à l'effet des stress hydriques sur la température du couvert qui, de par la montée rapide qu'elle a connue, aurait atteint des valeurs supra-optimales pour la variété de mil ZATIB. En effet, les régimes thermiques de l'air et de la surface du sol, dépendants du taux d'humidité relative et de l'intensité de la radiation perçue, sont les sources calorifiques de vaporisation de l'eau contenue dans le système sol - plante. Leur augmentation autour des plants fait accroître le déficit de saturation en vapeur d'eau de l'atmosphère par une transpiration intense (Paul, 1981) ; ce qui conduit à la limitation de la photosynthèse et de la croissance de la plante (Sivakumar, 1993).

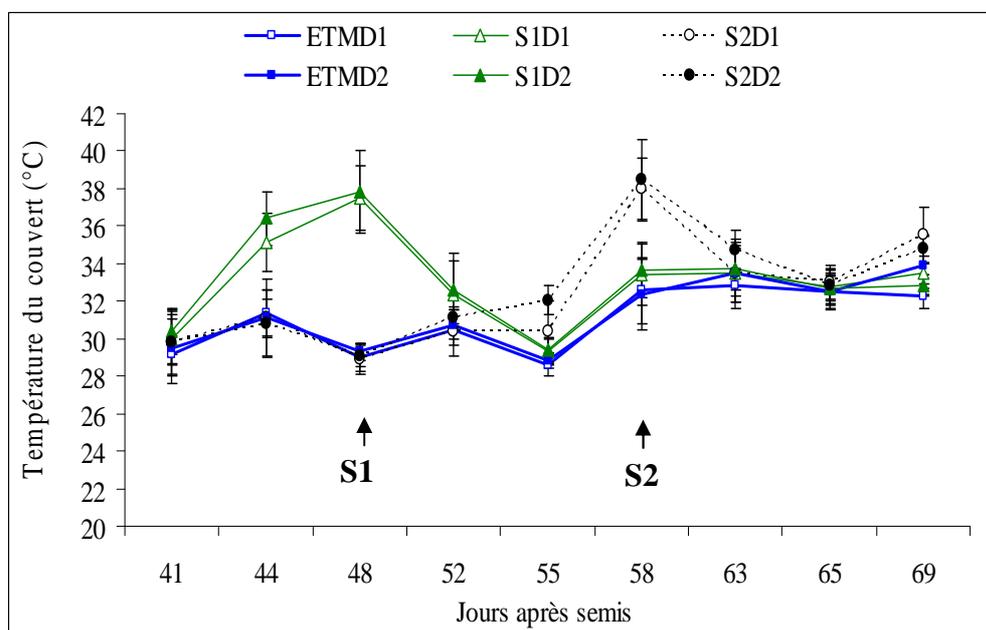


Figure 91 : Effet de 3 régimes hydriques (ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison) associés à 2 densités de semis (D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹) sur la température du couvert de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.

11.1.5. Développement des plants

La croissance des plants a été évaluée par un comptage régulier du nombre de feuilles ligulées qui apparaissaient sur les brins maîtres de 3 poquets échantillonnés dans chaque parcelle élémentaire. Les résultats de la figure 92 montrent que les plants du régime hydrique ETM ont eu le nombre le plus élevé de feuilles ligulées à la fin du cycle. Ils ont été suivis par ceux du régime stressé S2, avec ceux du stress S1 ayant eu le plus faible nombre de feuilles. Cependant, vers le début du cycle, la fréquence d'émission des feuilles était la même pour les plants de tous les traitements, jusqu'à l'application du premier stress (S1) au 39^e JAS (510 degrés jours). Ceci signifie qu'en situations hydrique et de fertilité du sol non limitantes, la densité de semis n'a pas d'effet sur le développement des plants, de la levée jusqu'à la montaison (figure 92). Cependant, le stress hydrique S1 a retardé l'émission des feuilles, donc le développement des plants, par rapport à ceux qui étaient maintenus en conditions hydriques ETM. La même figure 92 montre que la baisse de la croissance a été plus accentuée chez les plants de la forte densité de semis, du fait de leur plus grande sensibilité au déficit hydrique. En effet, cette sensibilité s'explique par le nombre de plants plus élevé dans la parcelle, ce qui entraîne une consommation hydrique plus importante. Les résultats des mesures sur l'humidité du sol (voir plus loin) qui confirment ce constat, permettent de souligner déjà que la faible densité de semis est la mieux indiquée pour réduire le risque de l'impact négatif des déficits hydriques intra-saisonniers sur la croissance de la culture, tel que suggéré par Anonyme (1993).

Par contre, le deuxième stress (S2), appliqué à partir du 56^e JAS, n'a pas eu d'effet sur l'émission des feuilles. Ceci est dû au fait que son application a coïncidé avec le début de l'épiaison, stade phénologique mettant fin à l'apparition de nouvelles feuilles, chez les céréales. On note cependant à ce stade un léger effet de la densité de semis qui a permis aux plants plus espacés d'émettre une à deux feuilles de plus que ceux densément semés, pour tous les régimes hydriques.

Quant à la durée de vie des feuilles sur les brins maîtres, elle n'a pas été affectée par la densité de semis. Seuls les traitements stressés (S2) ont accéléré la sénescence de leurs feuilles (figure 93). Cette figure montre que la mort des feuilles a été plus accrue avec le stress S2 appliqué pendant l'épiaison, stade pendant lequel les besoins en eau de la culture étaient les plus élevés (Somé, 1990 ; Kaushik et Gautam, 1994).

Cependant, la densité de semis a eu un effet sur le nombre de talles émises, du 39^e JAS (510 degrés jours) à la maturité ; période pendant laquelle la faible densité de semis a été plus favorable au tallage, aussi bien sous les stress S1 et S2 qu'en conditions hydriques ETM (figure 94). Cette variation, aussi observée sous le régime hydrique ETM dans des parcelles

suffisamment fertilisées, serait liée à la forte densité de semis qui aurait accentué le taux de recouvrement foliaire pour entraver le développement des jeunes talles par limitation de la réception de la lumière vers la base des plants. Une telle situation d'encombrement végétatif favoriserait aussi la montée de la température à l'intérieur du feuillage par l'insuffisance d'aération (Paul, 1981 et Bacci, 1994), étouffant ainsi les jeunes talles.

Les déficits hydriques S1 et S2 ont affecté l'émission des talles et la longévité de celles-ci selon la densité de semis (figure 94). En effet, les plants de la faible densité de semis ont été moins sensibles aux stress hydriques en perdant moins de talles que ceux de la forte densité, comme l'ont également signalé Coulibaly *et al.*, (1988). Les plants du régime ETM ont développé plus de talles (jusqu'à 17 talles pour la faible densité et 14 pour la forte) et en ont perdu moins que ceux des régimes stressés S1 et S2. La mortalité de talles a été plus accélérée chez les plants soumis au stress hydrique S2, appliqué pendant l'épiaison, cela surtout dans les parcelles à forte densité de semis.

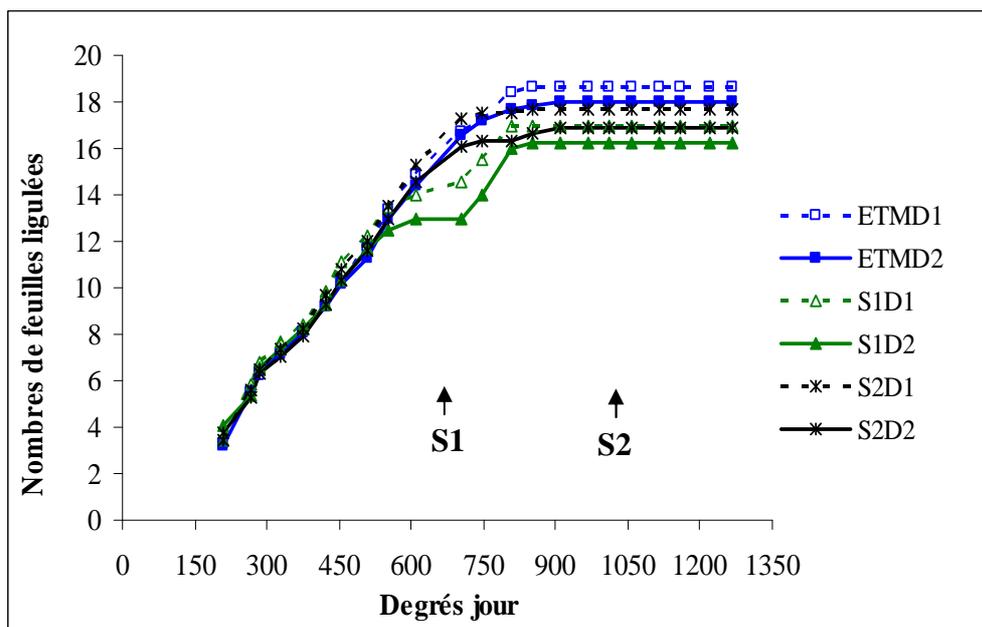


Figure 92 : Effet de 3 régimes hydriques (*ETM* = évapotranspiration maximale, *S1* = stress pendant la montaison et *S2* = stress pendant l'épiaison) associés à 2 densités de semis (*D1* = 16666 plants ha^{-1} et *D2* = 31250 plants ha^{-1}) sur le rythme d'apparition des feuilles sur les plants de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambey, 2004.

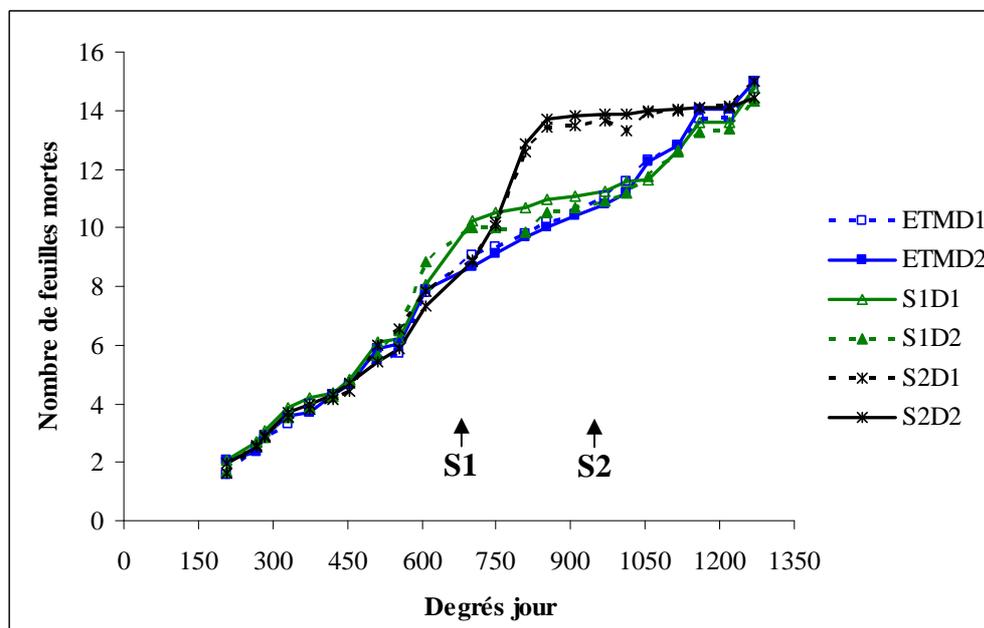


Figure 93 : Effet de 3 régimes hydriques (*ETM* = évapotranspiration maximale, *S1* = stress pendant la montaison et *S2* = stress pendant l'épiaison) associés à 2 densités de semis (*D1* = 16666 plants ha^{-1} et *D2* = 31250 plants ha^{-1}) sur la mortalité des feuilles sur les plants de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambey, 2004.

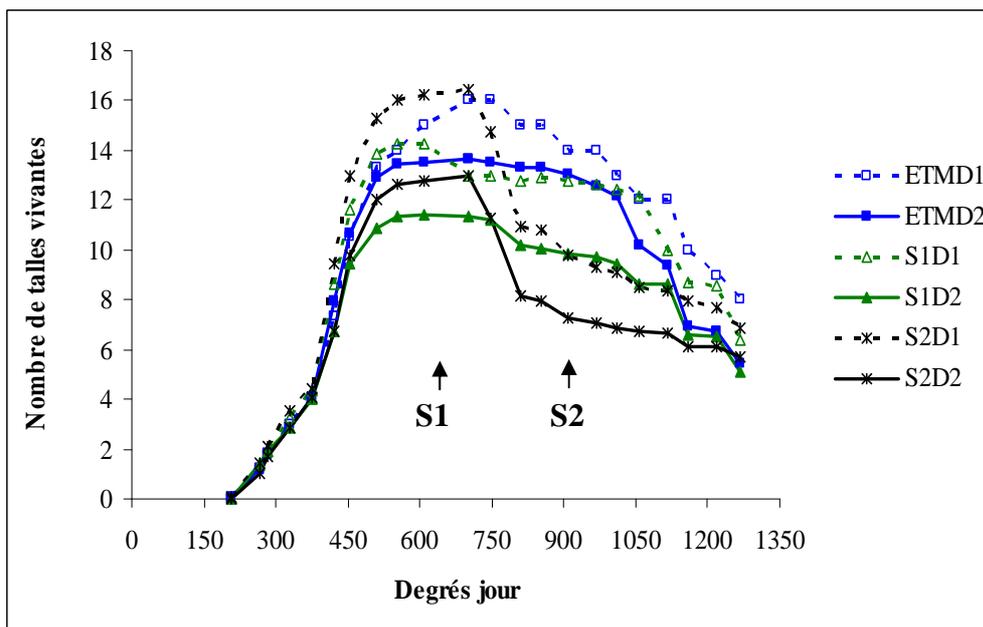


Figure 94 : Effet de 3 régimes hydriques (*ETM* = évapotranspiration maximale, *S1* = stress pendant la montaison et *S2* = stress pendant l'épiaison) associés à 2 densités de semis (*D1* = 16666 plants ha^{-1} et *D2* = 31250 plants ha^{-1}) sur le nombre de tiges vivantes sur les plants de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambe, 2004.

11.1.6. Composantes du rendement

Les composantes du rendement de la variété de mil ZATIB ont varié en fonction des densités de semis et des différents régimes hydriques (tableau XXII). Les plants ayant bénéficié du régime hydrique ETM ont été les plus productifs, aussi bien en grains qu'en paille. Ils sont suivis par ceux soumis au stress S1 et ceux du stress S2 qui ont été les moins productifs avec toutes les deux densités de semis. Le poids de 1000 grains a été significativement diminué par l'augmentation de la densité de semis, particulièrement sous le régime hydrique S2. En effet, il a été plus élevé sous le régime hydrique ETM que sous le stress S1 et surtout S2, où le remplissage des grains a été le plus faible. Ces mêmes résultats ont été obtenus par Coulibaly *et al.*, (1988). Cependant, excepté le rendement grains, il n'y a pas eu de différence significative entre les différents rendements obtenus sous les régimes hydriques ETM et S1, ainsi qu'entre ceux obtenus avec S1 et S2. Les rendements paille n'ont pas été statistiquement différents en fonction du régime hydrique, cela malgré le fait que les plants du stress S1 aient produit 792 kg ha⁻¹ de paille de moins que ceux du stress S2 et jusqu'à 1005 kg ha⁻¹ de moins que ceux du régime hydrique ETM. Quant à la densité de semis, elle a eu un effet significatif aussi bien sur les rendements en épis que sur ceux en grains et en paille, ainsi que le poids de 1000 grains, cela, quel que soit le régime hydrique (tableau XXII). En dépit de la fertilité du sol suffisante, la faible densité de semis a été plus rentable que la forte, aussi bien en épis, en grains qu'en paille. Le rendement en grains (3 120 kg ha⁻¹) obtenu, avec la faible densité de semis associée à des conditions hydrique et de fertilité du sol suffisantes à Bambey au Sénégal, a largement dépassé, voire même doublé le rendement potentiel (1 500 à 2 000 kg ha⁻¹) défini pour la même variété au Niger (cf. fiche technique à l'Institut National de Recherche Agronomique du Niger, INRAN). Les résultats du tableau XXII montrent que, même dans les conditions des stress hydriques S1 et S2, la variété ZATIB de mil a mieux produit à Bambey qu'à Niamey où, durant deux saisons pluvieuses (2002 et 2003), ses rendements en grains n'ont guère dépassé 1 250 kg ha⁻¹ avec les mêmes densités de semis (tableaux XIX et XX). Ceci dénote l'impact à la fois du type de sol et du climat sur la productivité de cette variété de mil qui a eu, à Bambey au Sénégal, un potentiel de production difficile à atteindre dans les conditions de culture au Niger.

En effet, à Bambey le développement de la variété a été très exubérant si bien qu'il a été assez encombrant dans les parcelles à forte densité de semis (figure 95). Un des inconvénients de ce genre d'encombrement est de limiter l'interception de la lumière par les jeunes talles, particulièrement dans des zones autres que le Sahel, où le rayonnement solaire n'est généralement pas un facteur limitant. La figure 95 (A et B) illustrent cela, où l'on observe une couleur des feuilles plus foncée chez les plants de la faible densité de semis que chez ceux de la forte densité. En effet, lorsque le taux de recouvrement foliaire est très élevé chez le mil

(plante héliophile par excellence), l'insuffisance de lumière qui en résulte fait perdre aux plants leur couleur, et l'étiollement qui s'en suit se caractérise par un allongement des entrenœuds des tiges, une réduction de la surface des feuilles et une restriction du développement des tissus conducteurs et de soutien. Ceci expliquerait la faiblesse des rendements des plants de la forte densité de semis dans cet essai, comme l'ont indiqué Maïdoukia (1980) et Begué (1991).

Ces observations font de la densité de semis, un paramètre important pour la réussite de la culture du mil au Sahel. Elle affecte le remplissage des grains relativement à l'aridité et à la fertilité du sol. C'est ainsi que son interaction avec le régime hydrique, dans les conditions de fertilité du sol suffisante de notre essai, a permis aux plants de la faible densité de semis de donner les meilleurs rendements grains.

Tableau XXII : Rendements en épis, en grains, en paille et poids de 1000 grains de la variété de mil ZATIB soumise aux effets de 3 régimes hydriques (*ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison*) associés à 2 densités de semis (*D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹*), en conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambey, 2004.

Rendement (kg ha ⁻¹)	Densité de semis	Régime hydrique			
		ETM	S1	S2	Moyenne
Épis	D1 (16 666 plants ha ⁻¹)	4381ad	3827bd	3111b	3773a
	D2 (31 250 plants ha ⁻¹)	4094a	3339ac	2687c	3373c
	Moyenne	4238a	3583ab	2899b	3573
Grains	D1 (16 666 plants ha ⁻¹)	3119a	2509bc	1807df	2479a
	D2 (31 250 plants ha ⁻¹)	2746b	2193cf	1482d	2140b
	Moyenne	2932a	2351b	1645b	2309
Poids de 1000 grains (g)	D1 (16 666 plants ha ⁻¹)	9.38a	8.75ac	8.87ab	9.00a
	D2 (31 250 plants ha ⁻¹)	9.06ac	8.34bcd	7.77d	8.39b
	Moyenne	9.22a	8.54ab	8.32b	8.70
Paille	D1 (16 666 plants ha ⁻¹)	4687ac	4042ac	4865a	4531a
	D2 (31 250 plants ha ⁻¹)	4667ac	3302b	4062bc	4010b
	Moyenne	4677a	3672a	4464a	4271

Les résultats suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %.



Figure 95 : Couverture végétative des plants de la variété de mil ZATIB en fonction des densités de semis $D1 = 16\ 666\ \text{plants ha}^{-1}$ (A) et $D2 = 31\ 250\ \text{plants ha}^{-1}$ (B), dans des conditions hydriques et de fertilité du sol non limitantes. Bambey, 2004.

11.2. Variation de l'humidité du sol dans la zone racinaire

11.2.1. Stock hydrique

Le stock d'eau dans la zone racinaire a surtout varié en fonction du régime hydrique. L'impact de ce dernier a été plus déterminant pendant les stress S1 et S2 qui ont entraîné une baisse importante du stock hydrique dans les tranches 0 à 40 cm et 0 à 80 cm du sol (figure 96). La chute du stock d'eau dans la tranche 0-40 cm du sol a légèrement concerné les parcelles mises en conditions hydriques ETM. Ceci est dû au fait que la quantité d'eau apportée (25 mm tous les 3 à 5 jours) a été insuffisante pour maintenir élevé le stock d'eau dans ces parcelles où la couverture végétative a été exubérante, entre le 30^e et le 70^e JAS (figure 95). En plus, des températures maximales journalières supérieures à 40 °C ont été observées pendant cette période pour contribuer ainsi à augmenter la demande évaporative. Le stock d'eau dans la tranche 0-40 cm du sol a varié entre 30 et 35 mm dans toutes les parcelles jusqu'au 39^e JAS. Avec l'installation des stress hydrique S1 (à partir du 39^e JAS) et S2 (à partir du 56^e JAS), cette tranche de sol ne contenait plus que 25 à 30 mm dans les parcelles non stressées (ETM) et seulement 10 mm dans celles stressées (S1 et S2).

La reprise effective des irrigations a entraîné une montée du stock d'eau entre le 70^e et 90^e JAS. Cette montée a été plus importante dans les parcelles à faible densité de semis que dans celles à forte densité soumises au stress S1 (figure 96A). Ceci dénote un effet de la densité de semis qui a été plus important dans les parcelles ETM, du 20^e JAS à la fin du cycle. En effet, durant cette période, le stock d'eau a été constamment plus élevé dans les parcelles à faible densité de semis du régime hydrique ETM. Cet effet densité a cependant été amoindri par l'impact des déficits hydriques S1 et S2 qui ont fait baisser le stock en eau presque de la même manière dans toutes les parcelles. Ceci serait dû à la demande évaporative élevée en contre-saison. En effet, l'impact du déficit hydrique, qui s'amplifie par la baisse de l'humidité relative qu'il provoque, se manifeste au niveau de la faible densité de semis par une forte perte d'eau par évaporation sol et au niveau de la forte densité par la transpiration qui s'accroît à travers l'abondance du feuillage (Daamen *et al.*, 1994 ; Mason, 2001).

Plus en profondeur dans la tranche 0-80 cm, le stock d'eau a varié entre 45 et 65 mm dans les parcelles ETM et entre 20 et 60 dans celles stressées, selon les périodes du cycle (figure 96B). Cependant, en dehors de cette hausse de stock d'eau ainsi observée avec la profondeur de sol, les impacts conjugués des régimes hydriques et des densités de semis ont été les mêmes que ceux observés dans la couche 0-40 cm du sol. Ceci permet d'attester la présence des racines jusqu'à la limite du profil d'humectation se situant autour de 100 cm de profondeur.

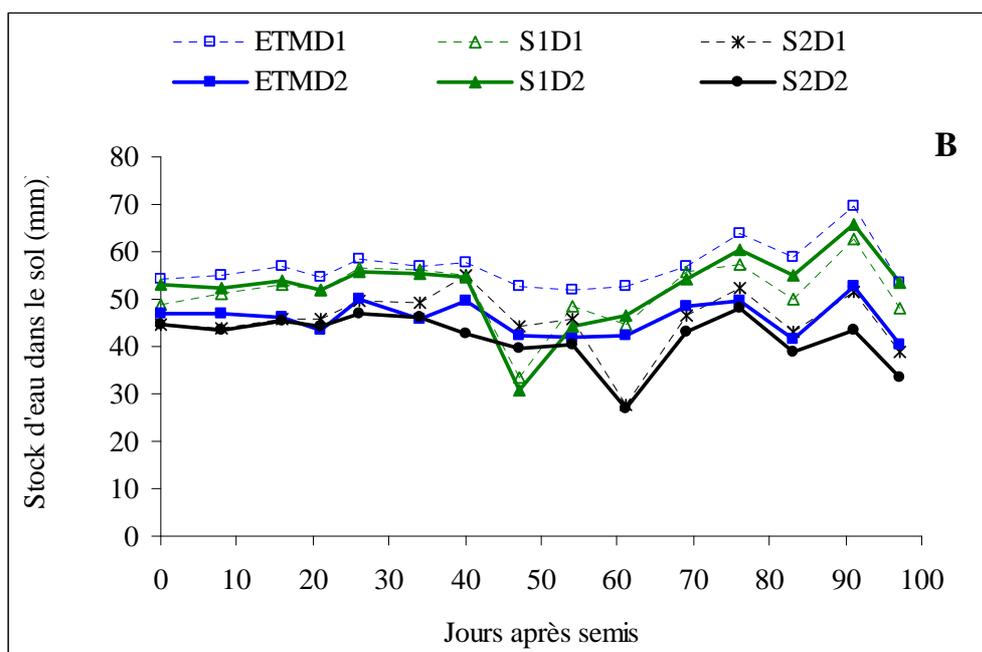
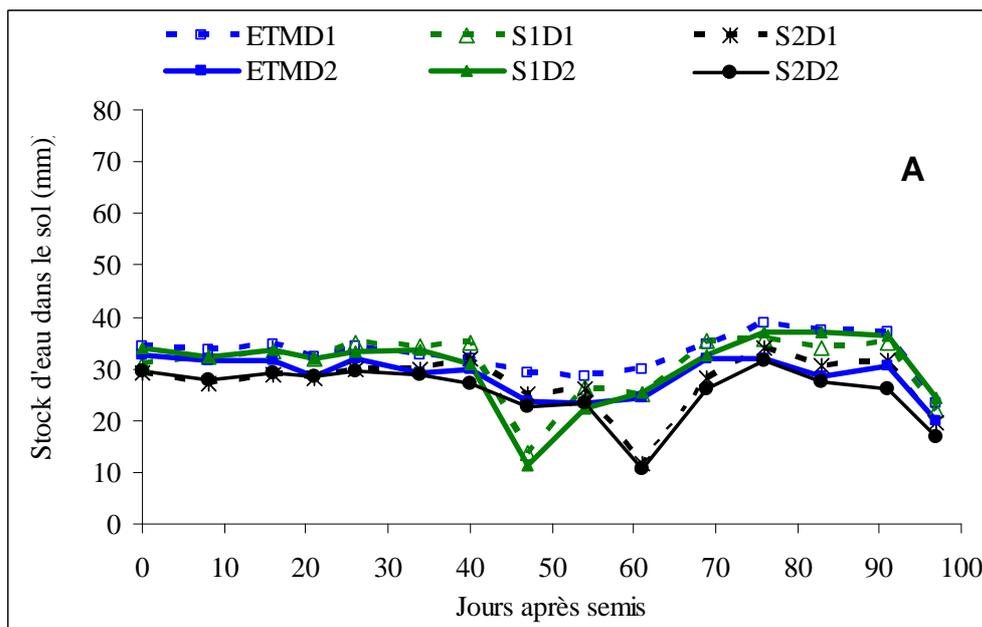


Figure 96 : Effet de 3 régimes hydriques (*ETM* = évapotranspiration maximale, *S1* = stress pendant la montaison et *S2* = stress pendant l'épiaison) associés à 2 densités de semis (*D1* = 16666 plants ha^{-1} et *D2* = 31250 plants ha^{-1}) sur le stock d'eau dans les tranches 0-40 cm (A) et 0-80 cm (B) du sol. Variété de mil ZATIB soumise à des conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambey, 2004.

11.2.2. Consommation hydrique

Les évapotranspirations réelles (ETR) journalières mesurées en conditions hydriques ETM pour la variété ZATIB du mil ont été faibles en début de cycle (2,5 mm j⁻¹ au 8^e JAS). Cependant, elles ont graduellement augmenté avec le développement des plants jusqu'à atteindre 8,6 mm j⁻¹ à l'épiaison (56^e JAS), avant de chuter à moins de 5 mm j⁻¹ vers la fin du cycle, avec la sénescence des feuilles (figure 97). Cette figure montre également que les déficits hydriques S1 et S2 ont entraîné une baisse très significative des ETR, jusqu'à 1,9 mm j⁻¹ au 56^e JAS pour le premier stress et 1,2 mm j⁻¹ au 69^e JAS pour le second. Avec, la reprise des irrigations, l'ETR des plants stressés a augmenté rapidement jusqu'à atteindre celle observée dans les parcelles ETM au 61^e JAS pour S1 et au 76^e JAS pour S2, pour toutes les densités de semis (figure 97). Pendant la phase critique de l'épiaison–floraison (du 47^e JAS au 60^e JAS), les ETR ont été supérieures aux évapotranspirations potentielles (ETo) journalières calculées à partir de la formule de Penman-Monteih (Allen *et al.*, 1998). Pour le mil, il est en effet normal d'obtenir des ETR plus élevées que les ETo pendant le stade de développement où le LAI de la culture est très élevé (plus de 2,5). Le même phénomène a été observé pour la variété Souna 3 du mil (Anonyme, 2002).

Quant à la densité de semis, elle n'a pas eu d'effet significatif sur la variation des ETR, sous tous les régimes hydriques et à tous les stades de développement de la culture. Ceci est probablement dû au fait que la forte densité de semis (couvert plus abondant) a fait augmenter la transpiration de la même manière que la faible densité (couvert plus épars) l'a fait pour l'évaporation sol, dans les conditions de demande évaporative élevée de la contre-saison.

11.2.3. Efficience d'utilisation d'eau

Dans les conditions de culture à Bambey au Sénégal, la variété ZATIB du mil a eu des efficacités d'utilisation de l'eau globalement élevée, allant de 3,4 à 6,2 kg de grains ha⁻¹ mm⁻¹, selon le régime hydrique et la densité de semis (tableau XXIII). En effet, ce tableau montre que le régime hydrique ETM a eu les meilleures efficacités, suivi du régime S1 et celui S2. Ceci confirme les résultats antérieurs mentionnant l'impact négatif des stress hydriques, dont les plus sensibles surviennent pendant la phase épiaison–floraison au Sahel, pour faire baisser les rendements du mil (Witt, 1981 ; Somé, 1990 ; Kaushik et Gautam, 1994 ; Nouri, 2001). L'efficacité d'utilisation de l'eau de cette variété a aussi été influencée par la densité de semis, avec laquelle les efficacités étaient élevées lorsqu'elle était faible, tant sous les conditions de stress que sous le régime hydrique ETM. Cette tendance est certes prévisible pour les situations de stress S1 et S2, mais pour le régime ETM nous espérons au contraire obtenir de meilleures efficacités d'utilisation de l'eau avec l'augmentation de la densité de semis, dans ces conditions de fertilité du sol supposée suffisante. Cependant, cette situation

pourrait s'expliquer d'une part par les irrigations insuffisantes pour mettre la culture dans des conditions d'ETM réelles, et d'autres parts par l'abondance de la biomasse qui aurait entravé le développement de talles productives dans les parcelles à forte densité de semis.

En dépit de toutes ces variations, les résultats de Bambey ont été meilleurs que ceux obtenus à l'Agrhymet, pour la même variété (tableau XXI). Ce tableau montre que les meilleures efficacités ($> 3 \text{ kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) ont été observées avec la faible densité de semis, associée ou non à l'apport d'urée. Les plus faibles efficacités ont été obtenues avec la forte densité de semis et, cela surtout en l'absence d'apport d'urée. A l'Agrhymet, l'efficacité la plus élevée était de $4,5 \text{ kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, avec le traitement azoté associé à la forte densité de semis en 2002.

Ces résultats montrent que les stress hydriques qui surviennent avant le début de l'épiaison ne sont pas toujours fatals, si toutefois la reprise de l'approvisionnement en eau permet une bonne reprise du développement des plants. En effet, les plants ayant subi le stress S1 (appliqué à la montaison) ont produit mieux que ceux du stress S2 (appliqué pour une même durée pendant la période d'épiaison-floraison), comme cela avait été le cas en 2002 à Niamey.

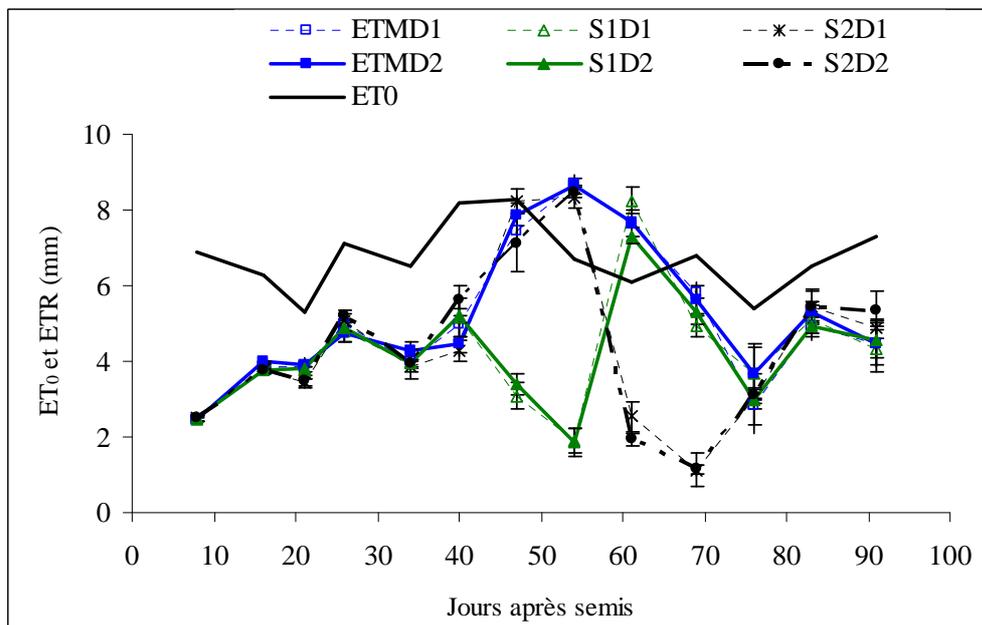


Figure 97 : Effet de 3 régimes hydriques (*ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison*) associés à 2 densités de semis (*D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹*) sur la variation de l'ETR de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. Bambey, 2004.

Tableau XXIII : Consommation hydrique, rendement grain et efficacité d'utilisation d'eau de la variété de mil ZATIB en fonction de 3 régimes hydriques (*ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison*) associés à 2 densités de semis (*D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹*), dans des conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambey, 2004.

	Traitements					
	ETMD1	ETMD2	S1D1	S1D2	S2D1	S2D2
ETR cycle (mm)	501,9	507,3	425,3	417,2	428,9	430,1
Rdt grains (kg ha⁻¹)	3119	2746	2509	2193	1807	1482
Efficience (kg ha⁻¹ mm⁻¹)	6,2	5,4	5,9	4,8	4,2	3,4

11.2.4. Fraction d'eau du sol transpirable

La fraction d'eau du sol transpirable ou "fraction of transpirable soil water (FTSW)" par la culture a surtout varié en fonction des régimes hydriques, du 39^e JAS (500 degrés jours) à la récolte (figure 98). En effet, étant élevée vers le début du cycle, la FTSW a connu une baisse relativement uniforme et progressive avec le développement des plants de tous les traitements, jusqu'à la montaison (500 degrés jours). L'effet du régime hydrique et celui de la densité de semis (dans une moindre mesure) ont commencé à être important pendant la période d'installation des stress S1 et S2 ; c'est à dire de la montaison à la floraison. Avec la suspension des irrigations, la FTSW a connu une importante baisse jusqu'à un seuil de 0,3 pour S1 et 0,2 pour S2 (figure 98). Ces valeurs n'étaient pas loin d'être des seuils critiques pour la variété testée, puisqu'elles sont obtenues dans des situations de flétrissement excessif des plants, au bout des 14 jours qu'a duré la suspension des irrigations pour chacun de ces stress hydriques. En l'absence de stress, la FTSW a varié entre 0,4 et 0,8 selon la densité de semis, du 39^e JAS (500 degrés jours) à la fin du cycle. Cet important écart est dû à l'effet de la densité de semis dans les parcelles ETM. En effet, la FTSW a été constamment plus élevée dans les parcelles à faible densité de semis, sous les régimes hydriques ETM et S2. Cependant, le phénomène inverse a été observé après la levée du stress S1, du 61^e JAS (810 degrés jours) à la récolte (figure 98). En effet, pendant cette période de sortie du stress S1, la FTSW a été constamment plus élevée avec la forte densité de semis. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le stress (S1) a plus affecté les plants de la forte densité en leur faisant perdre plus de feuilles et en diminuant ainsi leurs besoins en eau. Ce phénomène n'a pas été observé avec le stress S2 appliqué vers la fin du cycle, au moment où la sénescence foliaire avait commencé au niveau de tous les traitements. En effet, l'augmentation de la densité de semis accroît la consommation en eau de la culture et la rend plus vulnérable au déficit hydrique pendant les phases critiques de son développement. Selon Maracchi *et al.*, (1992) et Cantini (1995), la sécheresse influence tous les aspects de la croissance de la plante et le moindre déficit hydrique entraîne la sénescence des feuilles et le ralentissement de la croissance. Le stress hydrique de mi-parcours affecte le potentiel hydrique de la plante qu'il fait baisser considérablement pour ralentir l'expansion volumique des tissus avant de réduire l'indice foliaire, la captation du rayonnement, la photosynthèse, et finalement la production (Diouf, 2000). Ben Salam et Vieira Da Silva (1991) ont expliqué cela en indiquant que le manque d'eau amène la plante à prendre des mesures adaptatives pour diminuer ses besoins hydriques en accélérant notamment le dessèchement de ses feuilles les plus anciennes et de ses tiges les plus jeunes.

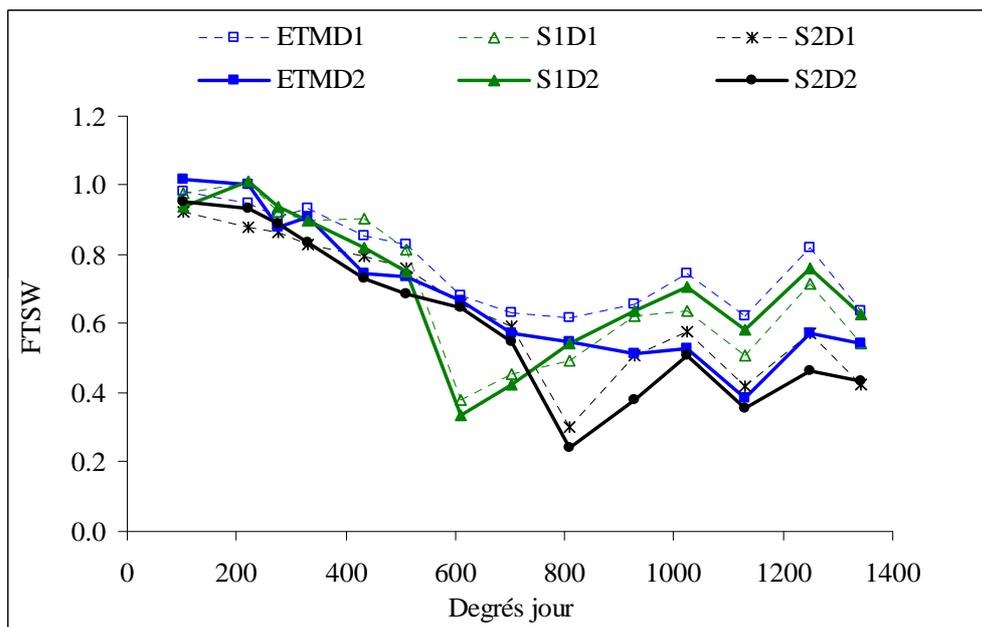


Figure 98 : Effet de 3 régimes hydriques (ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison) associés à 2 densités de semis (D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹) sur la variation de la fraction d'eau disponible pour les racines de la variété de mil ZATIB, en conditions de fertilité du sol non limitantes. Bambe, 2004.

11.3. Conclusion partielle

En synthèse, il ressort des résultats de cet essai que l'optimisation de la fertilité du sol et de la densité de semis permet d'accroître la production du mil. Toutefois, ces techniques d'intensification agricole comportent un grand risque de diminution de la production en cas de déficit hydrique. Cette réalité a été prouvée dans la présente étude à travers les variations observées dans la gestion de l'eau du sol et les réponses physiologiques de la plante vis-à-vis des traitements agronomiques appliqués. Nos résultats ont cependant montré que l'impact des déficits hydriques pourrait être amoindri pour permettre une certaine augmentation de la production, si l'on adopte, conjointement à la fertilisation du sol, des densités de semis modérées à faibles.

Le régime ETM a été plus favorable à la production en paille et en grains que les régimes S1 et S2. Les facteurs étudiés ont beaucoup affectés le poids de 1000 grains, donc la taille et le remplissage des grains. En dépit de la fertilité du sol suffisante, la variété ZATIB a donné des rendements grains plus élevés avec la faible densité de semis qu'avec la forte. A Bambey, les conditions de culture ont permis à cette variété de donner jusqu'à 3 120 kg ha⁻¹ avec la faible densité de semis associée au régime hydrique ETM, soit le double du rendement potentiel (1 500 à 2 000 kg ha⁻¹) qui lui a été défini par INRAN, à son origine au Niger. Ces rendements très élevés ont permis à la variété d'avoir des efficacités d'utilisation de l'eau également très élevées, la faible densité de semis ayant été plus efficiente que la forte et le régime hydrique S2 moins efficient que les régimes S1 et ETM. Ces résultats seront utilisés pour calibrer le modèle SARRA-H de simulation des rendements des cultures à partir des bilans hydrique et carboné.

Chapitre 12 : Résultats du calibrage du modèle SARRA-H

Le calcul des paramètres de calibrage du modèle SARRA-H a été fait à partir de données recueillies à Bambey, dans les parcelles de la faible densité de semis (16 666 plants ha⁻¹) irriguées en ETM. Cependant, il faut rappeler que certains paramètres n'ont pas été calculés dans le cadre de ce travail, mais ils ont été ajustés de façon à obtenir des simulations très proches des valeurs observées d'un même traitement (tableau IX).

Les résultats donnés par les simulations sont très comparables à ceux observés (figure 99). Cette figure montre que les courbes des valeurs simulées passent, pour la majorité des points, à l'intérieur des marges d'erreur (écart-type de la moyenne) déterminées sur la base des données observées. Seul le point de l'avant dernière observation, faite pendant la floraison, fait exception en montrant des valeurs légèrement surestimées par le modèle pour tous les paramètres simulés, à savoir la biomasse feuille, le LAI et la biomasse aérienne. Agossou (2004) a observé des écarts encore plus grands entre les biomasses foliaires simulée et observée du sorgho. Quant à nos résultats, hormis le point indiqué ci-dessus comme étant un peu irrégulier du fait probablement des erreurs de mesure, nous pouvons estimer très satisfaisant le paramétrage du modèle qui, en plus des résultats de la figure 99, a donné un rendement grains simulé (3151 kg ha⁻¹) très voisin de celui observé (3119 kg ha⁻¹), soit une surestimation par le modèle de seulement 1,02 %.

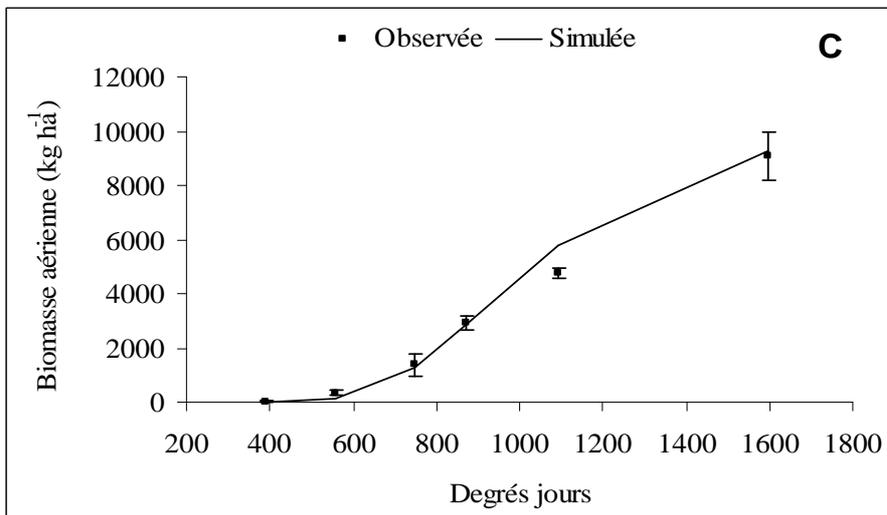
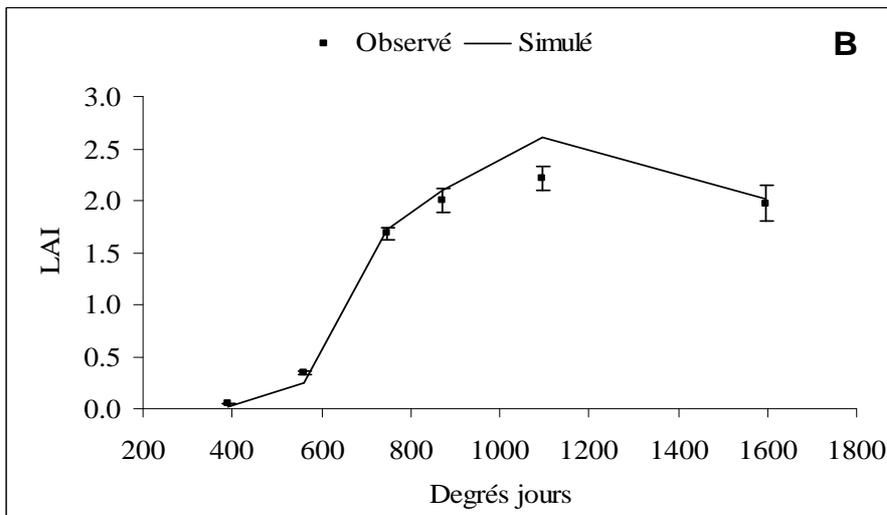
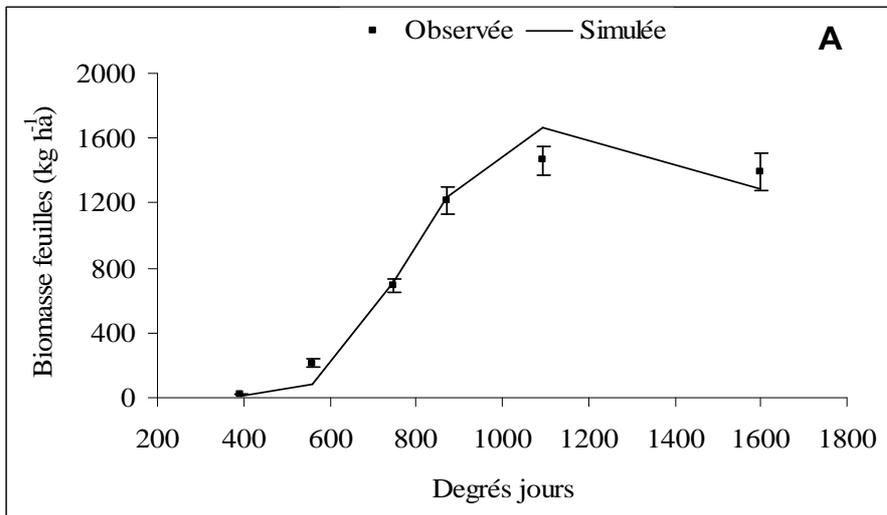


Figure 99 : Comparaison, après calibrage, des résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de 16666 plants ha⁻¹ en régime hydrique ETM. Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.

12.1. Validation du modèle

La validation du modèle a été faite d'abord sur les données recueillies dans les autres traitements du même essai de Bambey (variété de mil ZATIB soumise au régime hydrique ETM associé à une forte densité de semis et au régimes stressants (S1 et S2) associés aux deux densités de semis) avant d'être élargie aux résultats expérimentaux du CRA de Niamey.

12.1.1. Prise en compte de l'effet de la densité de semis

Pour le même régime hydrique ETM à Bambey et en changeant uniquement le nombre de plants ha^{-1} dans le premier paramétrage (31 250 plants ha^{-1} au lieu de 16 666 plants ha^{-1}), le modèle a simulé assez nettement l'évolution de la biomasse foliaire de la même variété de mil ZATIB jusqu'à la fin du cycle (figure 100A). Cependant, le LAI a été légèrement surestimé par le modèle, à la 4^e et à la 5^e observations faites pendant l'épiaison-floraison (figure 100B), de même que la biomasse aérienne à la 5^e observation (figure 100C). Quant au rendement grains simulé, il a été également surestimé de 11 % par rapport au rendement observé qui était de 2 746 kg ha^{-1} (tableau XXIV). Cependant, nous estimons que ces légers écarts ne sont pas de nature à affecter la validité du modèle dans la prise en compte de l'effet de la densité de semis sur la biomasse foliaire et le rendement grains de la variété de mil ZATIB, dans ces conditions hydriques ETM.

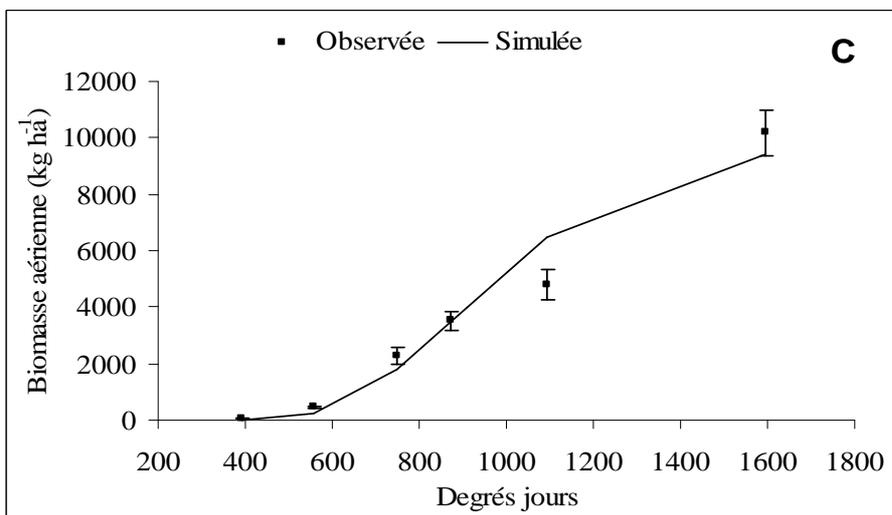
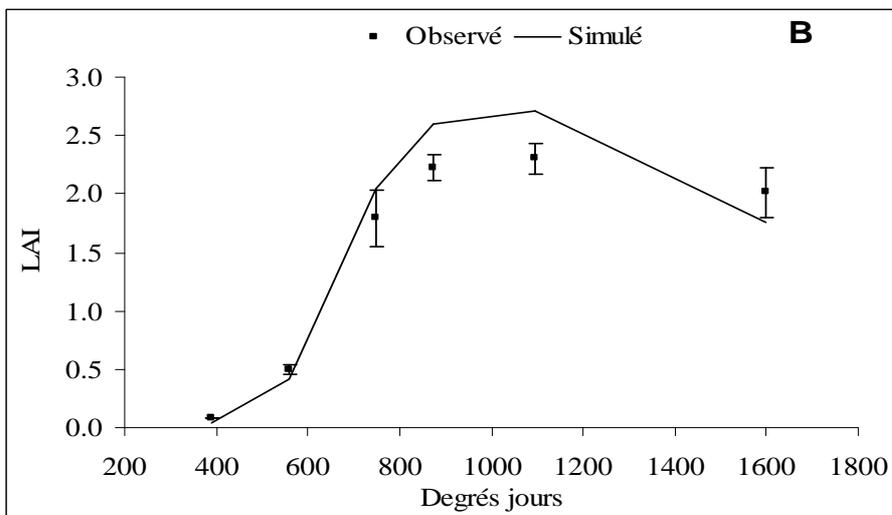
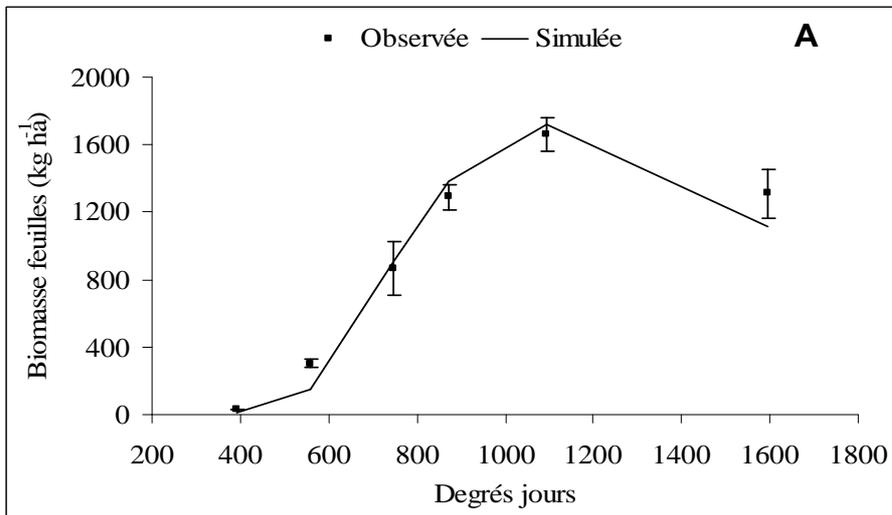


Figure 100 : Validation du modèle pour la densité de semis de la variété de mil ZATIB D2 (31250 plants ha⁻¹) associée au régime hydrique ETM : résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.

12.1.2. Prise en compte de l'effet du stress hydrique

La validation du modèle pour les différentes situations de stress hydrique a donné des résultats relativement satisfaisants. En effet, pour toutes les deux densités de semis, les simulations de la biomasse foliaire, du LAI, du rendement grains et de la biomasse aérienne ont montré des écarts globalement négligeables par rapport aux résultats observés, aussi bien pour le stress S1 que pour S2 (figures 101, 102, 103 et 104 et tableau XXIV). Ceci permet de dire que le calibrage du modèle a été acceptable pour la variété testée dans les différentes conditions de culture. Cependant, notons que sous le même régime hydrique ETM, le tableau XXIV montre que les rendements grains simulés ont été surestimés de 11 % avec la forte densité de semis contre seulement 01 % avec la faible densité de semis, par rapport aux rendements observés. En situation de stress, l'écart entre les rendements grains simulés et observés n'a pas changé avec la faible densité de semis, mais avec la forte densité, il a atteint 15 %. Ceci montre que le modèle tient peu compte du fait que le mil devient plus vulnérable au stress hydrique avec une forte densité de semis qu'avec une faible (Anonyme, 1993). Les résultats sur l'évolution du LAI confirment cette suggestion en montrant des écarts plus prononcés entre les valeurs simulées et observées pendant les périodes des stress hydriques (S1 et S2). En effet, pendant ces déficits hydriques, les valeurs observées du LAI ont été constamment inférieures à celles simulées, pour toutes les deux densités de semis. Ceci pourrait s'expliquer également par les erreurs dans les mesures de la surface foliaire au planimètre ; un appareil dont l'utilisation demande beaucoup de temps et nécessite le contrôle et le soin permanent de l'opérateur jusqu'à la fin de l'opération. En effet, sous l'impact du stress hydrique, beaucoup de feuilles flétries sont repliées. Si elles sont introduites dans le planimètre en cet état, leur surface sera sous-estimée. Ceci est une raison probable de la chute accrue du LAI observé par rapport à celui simulé, pour les situations des stress hydriques S1 et S2 (figures 101B, 102B, 103B et 104B).

Tableau XXIV : Comparaison entre les rendements grains observés et simulés par le modèle SARRA-H, pour 3 régimes hydriques (*ETM = évapotranspiration maximale, S1 = stress pendant la montaison et S2 = stress pendant l'épiaison*) associés à 2 densités de semis (*D1 = 16666 plants ha⁻¹ et D2 = 31250 plants ha⁻¹*) de la variété de mil ZATIB. Bambey, 2004.

Essai	Traitements	Rdts observés	Rdts simulés	Ecart entre simulé et observé (%)
Bambey 2004	ETMD1*	3119	3151	+ 01
	ETMD2	2746	3037	+ 11
	S1D1	2509	2486	- 01
	S1D2	2193	2513	+ 15
	S2D1	1807	1666	- 08
	S2D2	1482	1573	+ 06

Avec : * = traitement utilisé pour le calibrage

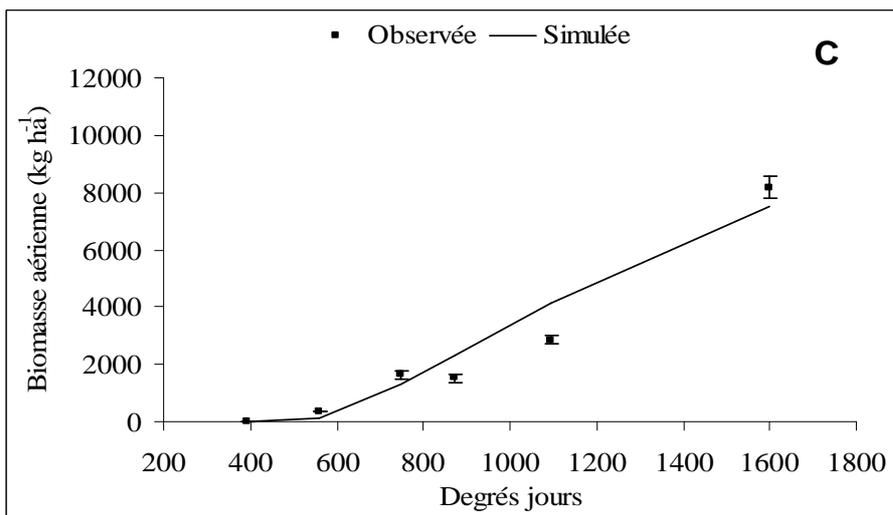
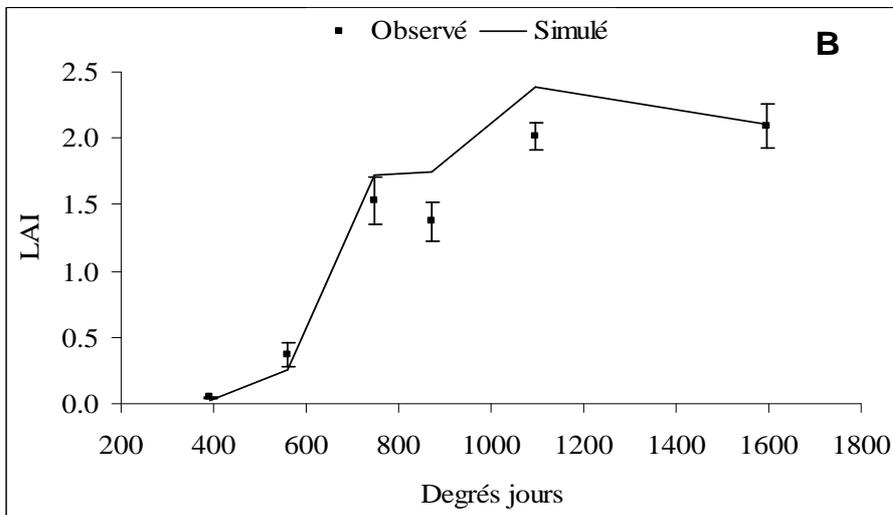
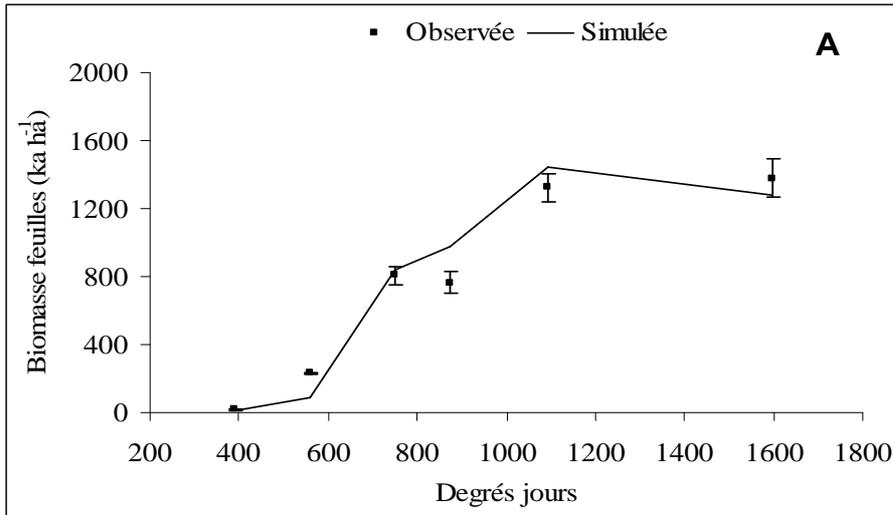


Figure 101 : Validation du modèle pour la densité de semis de 16666 plants ha⁻¹ de la variété de mil ZATIB soumise à un stress hydrique pendant la montaison (S1) : résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.

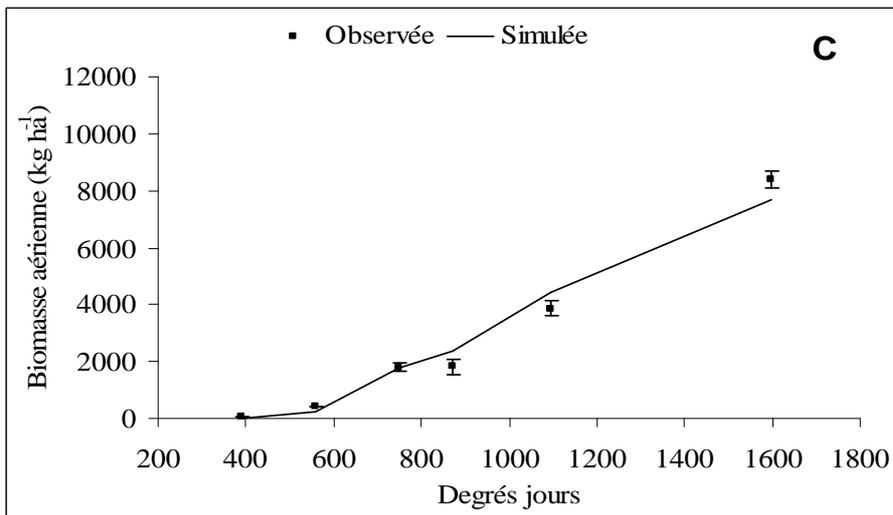
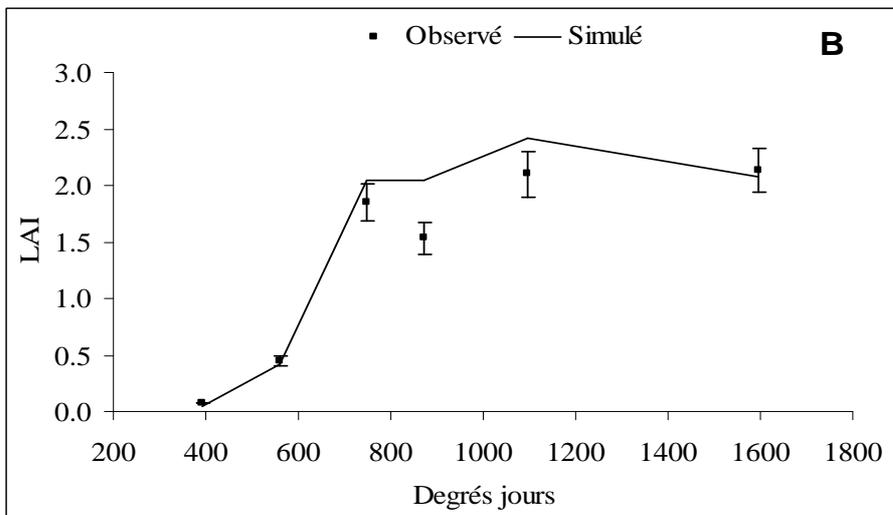
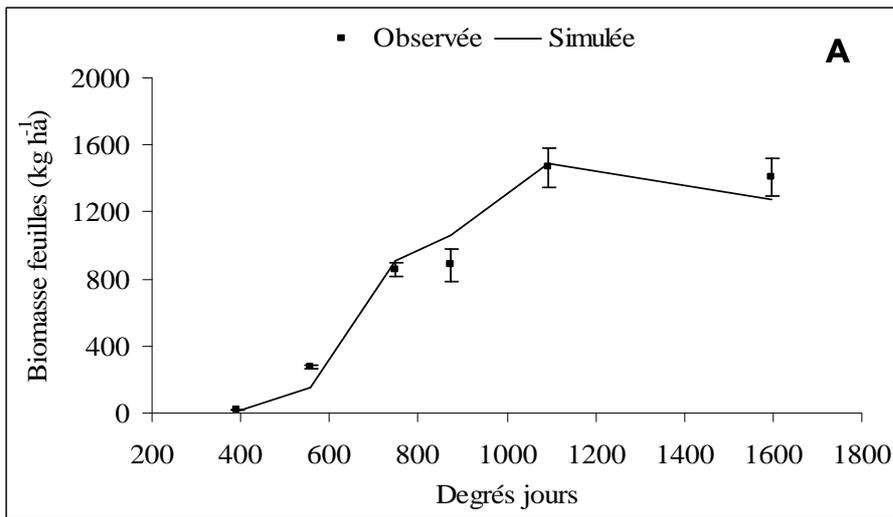


Figure 102 : Validation du modèle pour la densité de semis de 31250 plants ha⁻¹ de la variété de mil ZATIB soumise à un stress hydrique pendant la montaison (S1) : résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambeby, 2004.

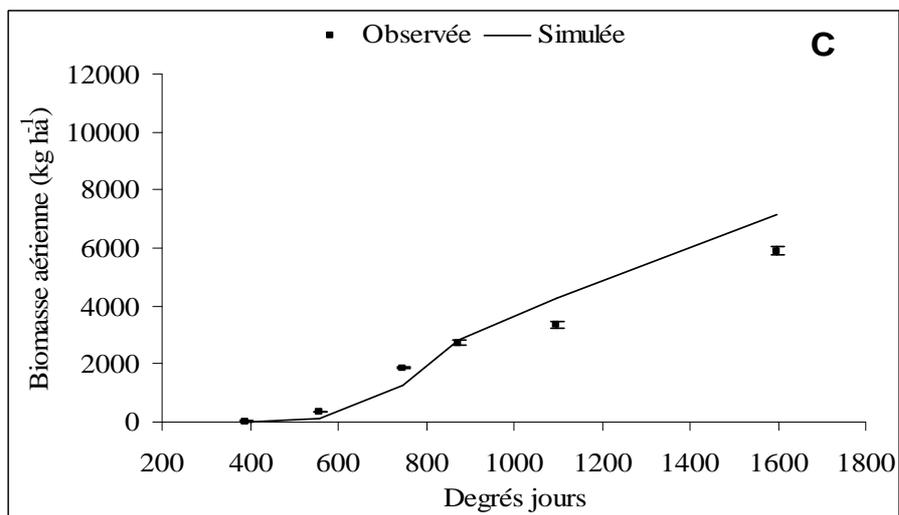
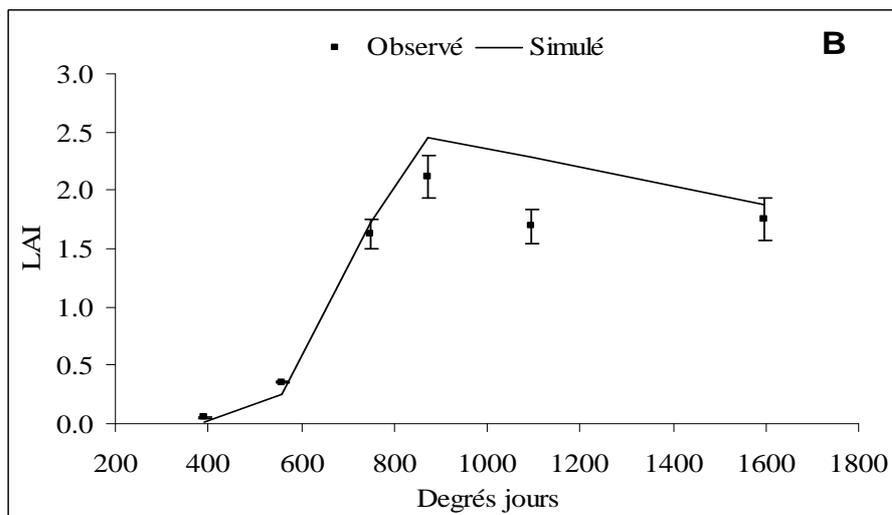
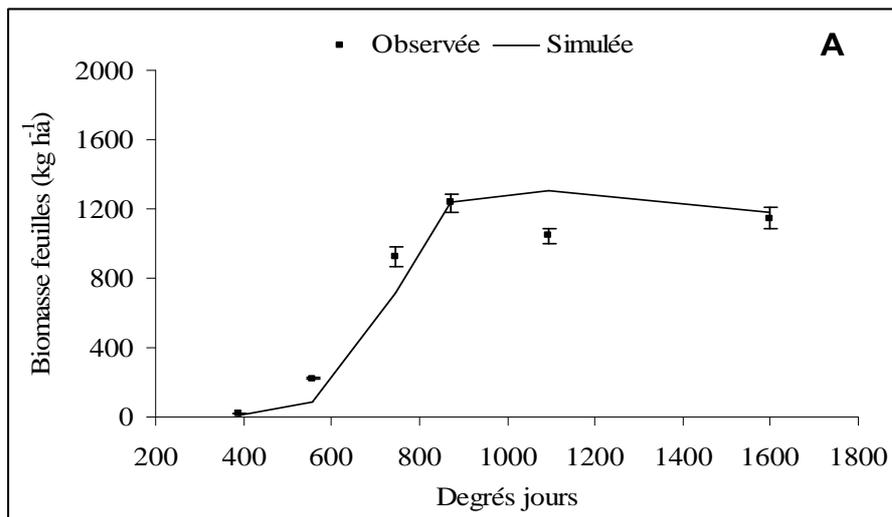


Figure 103 : Validation du modèle pour la densité de semis de 16666 plants ha⁻¹ de la variété de mil ZATIB soumise à un stress hydrique pendant l'épiaison (S2) : résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.

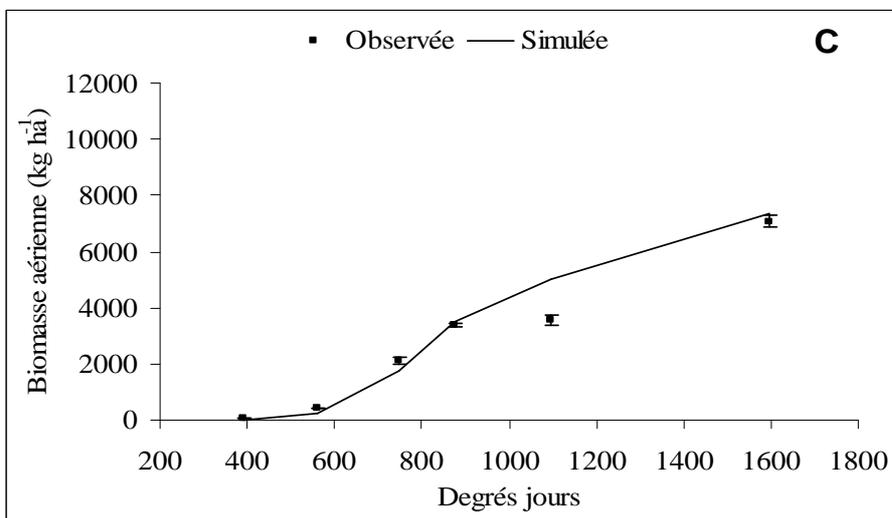
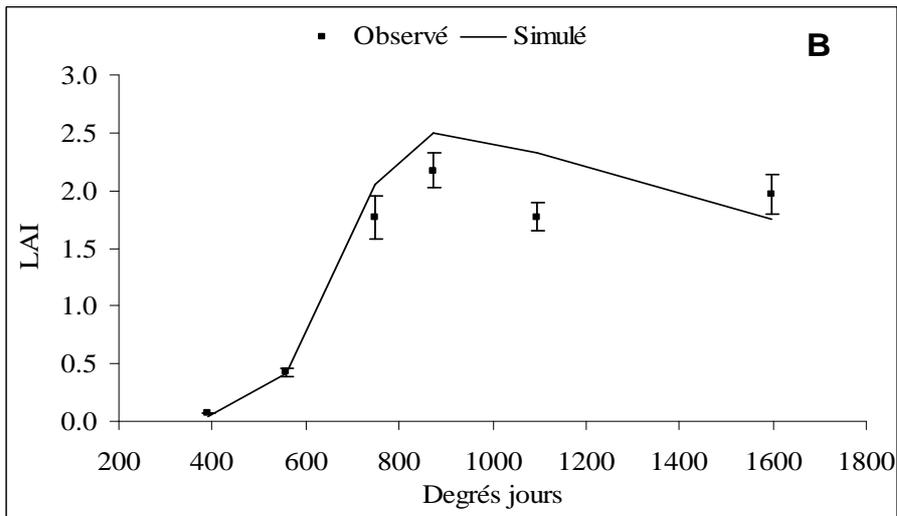
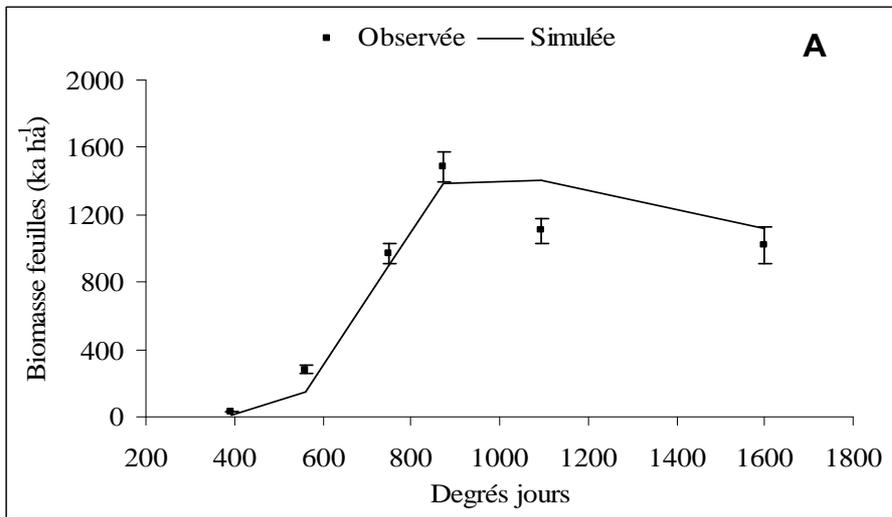


Figure 104 : Validation du modèle pour une densité de semis de 31250 plants ha⁻¹ de la variété de mil ZATIB soumise à un stress hydrique pendant l'épiaison (S2) : résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Bambey, 2004.

12.1.3. Fraction d'eau du sol transpirable par la plante : observée et simulée selon la densité de semis et le régime hydrique

La comparaison des simulations aux valeurs observées de la fraction d'eau du sol transpirable par la plante ou "fraction of transpirable soil water (FTSW)" montre que le modèle SARRA-H gère relativement bien la variation du stock d'eau à la disposition de la culture. En effet, il tient compte du régime hydrique dans l'évaluation de la FTSW suivant la même dynamique que les mesures réelles (figures 105A, B et C). Cependant, ces figures montrent que la FTSW a été surestimée par le modèle entre le tallage et l'épiaison (200 à 800 degrés jours) sous tous les régimes hydriques. Ceci justifie la surestimation souvent constatée des résultats simulés par rapport à ceux observés de la biomasse feuille, du LAI et du rendement grains, selon les traitements de densité de semis et de régime hydrique. Agossou (2004) a fait les mêmes observations par rapport au modèle, mais sur le sorgho. Ceci montre la nécessité de revoir les algorithmes de calculs du modèle pour qu'il prenne mieux en compte l'impact du stress hydrique sur la croissance et le développement de la culture. Les écarts constatés entre les valeurs simulées et observées de la FTSW sont peut-être dus au fait que le modèle sous-estime l'évaporation sol qui est plus élevée vers le début du cycle. En effet, le stress hydrique est estimé dans le modèle SARRA-H à partir de l'évapotranspiration réelle (ETR) de la culture, qui dépend de la quantité d'eau disponible, et de l'évapotranspiration maximale (ETM), qui correspond à la demande optimale de la culture selon la variété, le stade de développement, et la surface foliaire mise en place (Sultan, 2002).

Par ailleurs, on peut constater sur les figures 105A, B et C, que le modèle a très peu tenu compte de l'effet de la densité de semis dans les simulations de la FTSW, pour tous les trois régimes hydriques. En effet, excepté la figure 105B (traitement S1), on constate que les tracés des valeurs simulées de cette variable sont pratiquement confondus sur toute la durée du cycle, contrairement aux valeurs observées qui montrent quelques fois des baisses importantes de la FTSW dans les parcelles de la forte densité de semis.

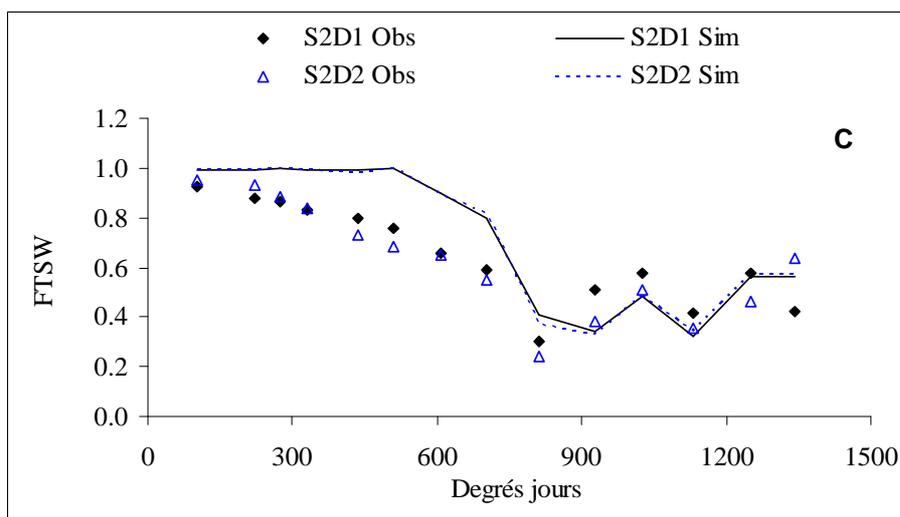
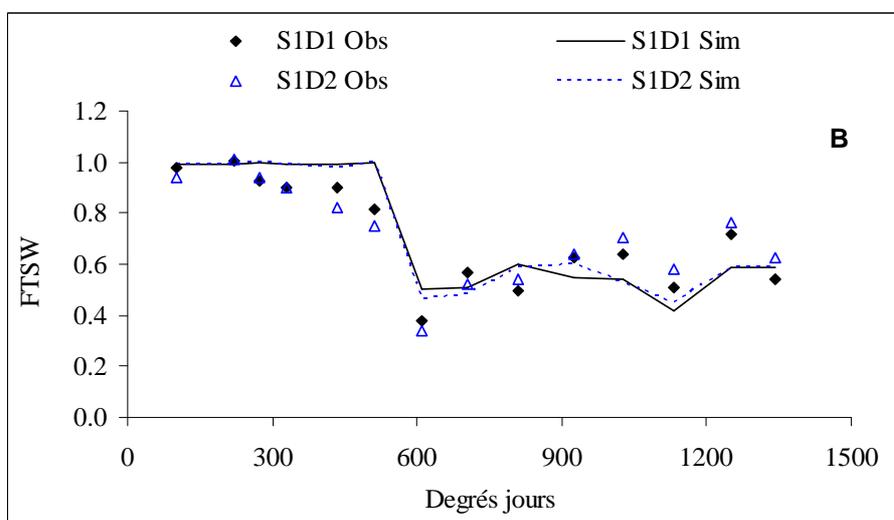
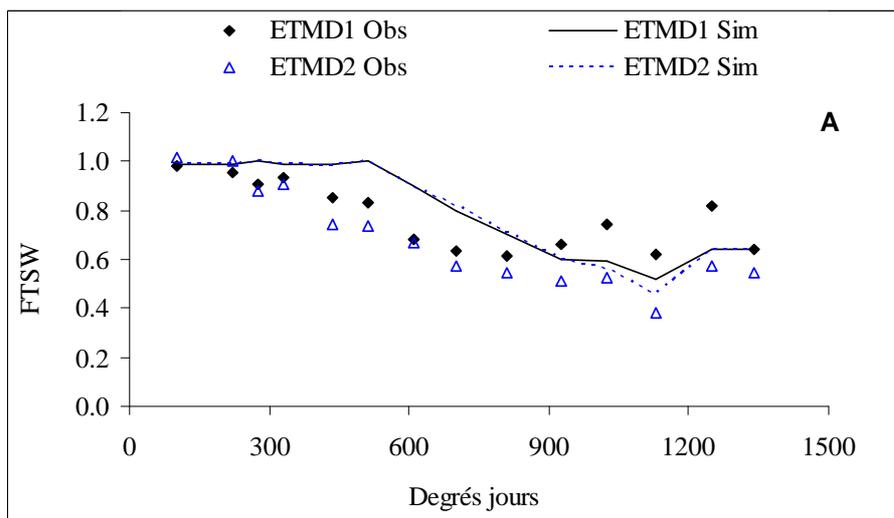


Figure 105 : Fraction d'eau du sol transpirable par la culture : variation des résultats observés (*Obs*) et simulés (*Sim*) selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants } ha^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants } ha^{-1}$) et le régime hydrique : ETM (A), stressé S1 (B) et stressé S2 (C). Bambey, 2004.

12.2. Sensibilité du modèle aux conditions de culture au CRA : effets de la date de semis, de l'apport d'urée et de la densité de semis

Au CRA, les essais ont été menés sur la variété ZATIB en conditions hydriques strictement pluviales, donc très contrastées, compte tenu de la grande variabilité des pluies qui caractérise le Sahel (Sivakumar 1989a). Ces conditions hydriques incertaines et aussi la très faible fertilité qui caractérise les sols lessivés des champs expérimentaux de ce Centre (Denis *et al.*, 1984), n'ont pas permis à la variété testée d'avoir des rendements, tant en biomasse foliaire qu'en grains, aussi élevés que ceux qu'elle a donnés à Bambey au Sénégal. Cette variation de la productivité de la variété est d'autant plus normale que le modèle SARRA-H devrait en tenir compte dans les simulations, à cause des différences entre les conditions pédo-climatiques des deux sites de culture. Les résultats obtenus ont eu tendance à répondre à cet objectif, mais avec des insuffisances tout de même notoires (figures 106 et 107 et tableau XXV).

Ainsi, les valeurs de LAI et de biomasses foliaire et aérienne simulées avec le modèle SARRA-H sont souvent très supérieures aux valeurs mesurées sur le terrain au CRA. En effet, en 2002, pour les mêmes densités de semis qu'à Bambey, les valeurs simulées en biomasse foliaire et en LAI ont été proches de celles observées sur le terrain, jusqu'aux 70° JAS, c'est-à-dire jusqu'autour d'un cumul thermique de 1200 degrés jours (figures 106 et 107). Toutefois, vers le 70° JAS en 2002, était survenu un stress hydrique dont l'effet a été plus prononcé sur la biomasse foliaire, le LAI et la biomasse aérienne observés, mais dont le modèle n'a pas fait ressortir (figures 106A, B et C). Les mêmes tendances ont été obtenues en 2003, mais avec des écarts encore plus élevés entre les résultats simulés et observés (figures 107A, B et C). En effet, la variété a connu un développement moins important en 2003 qu'en 2002, du fait, non pas d'un déficit hydrique sévère, mais de la baisse de la fertilité du sol.

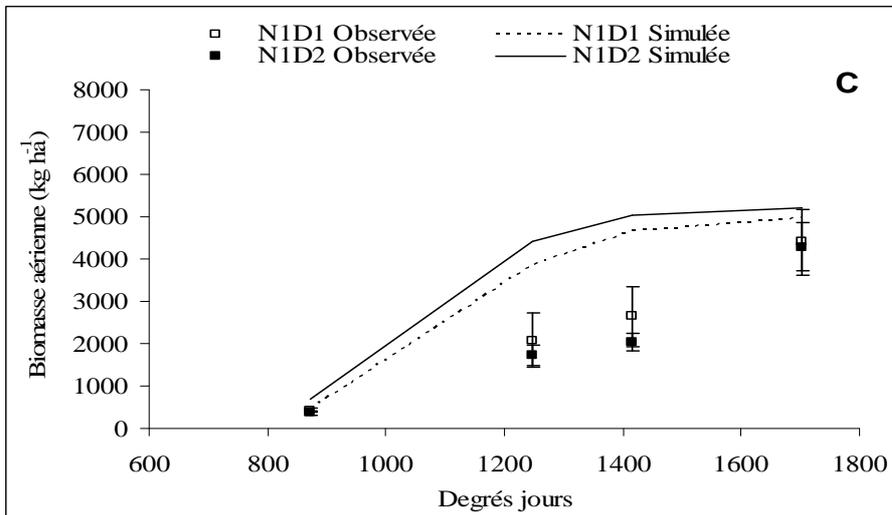
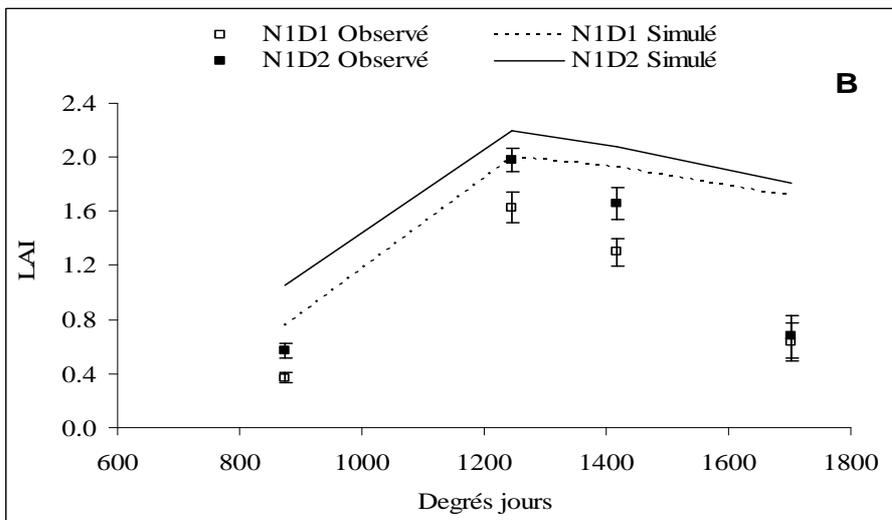
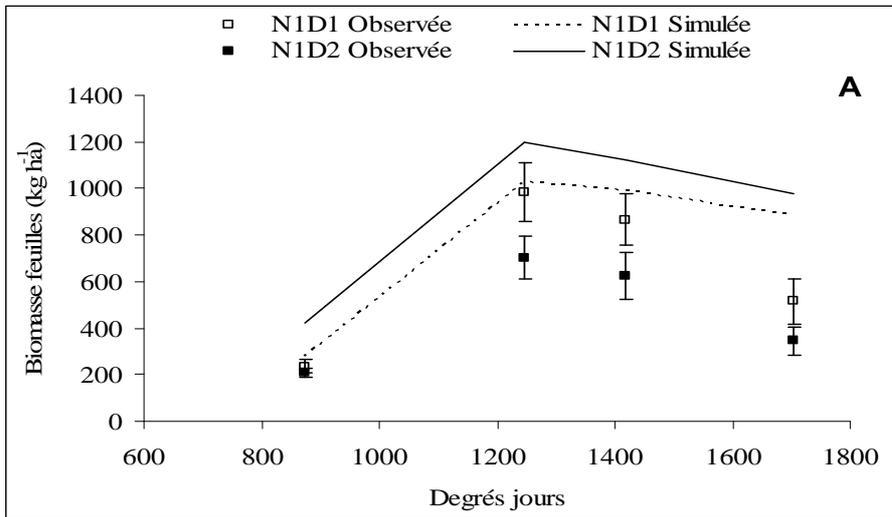


Figure 106 : Résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002.

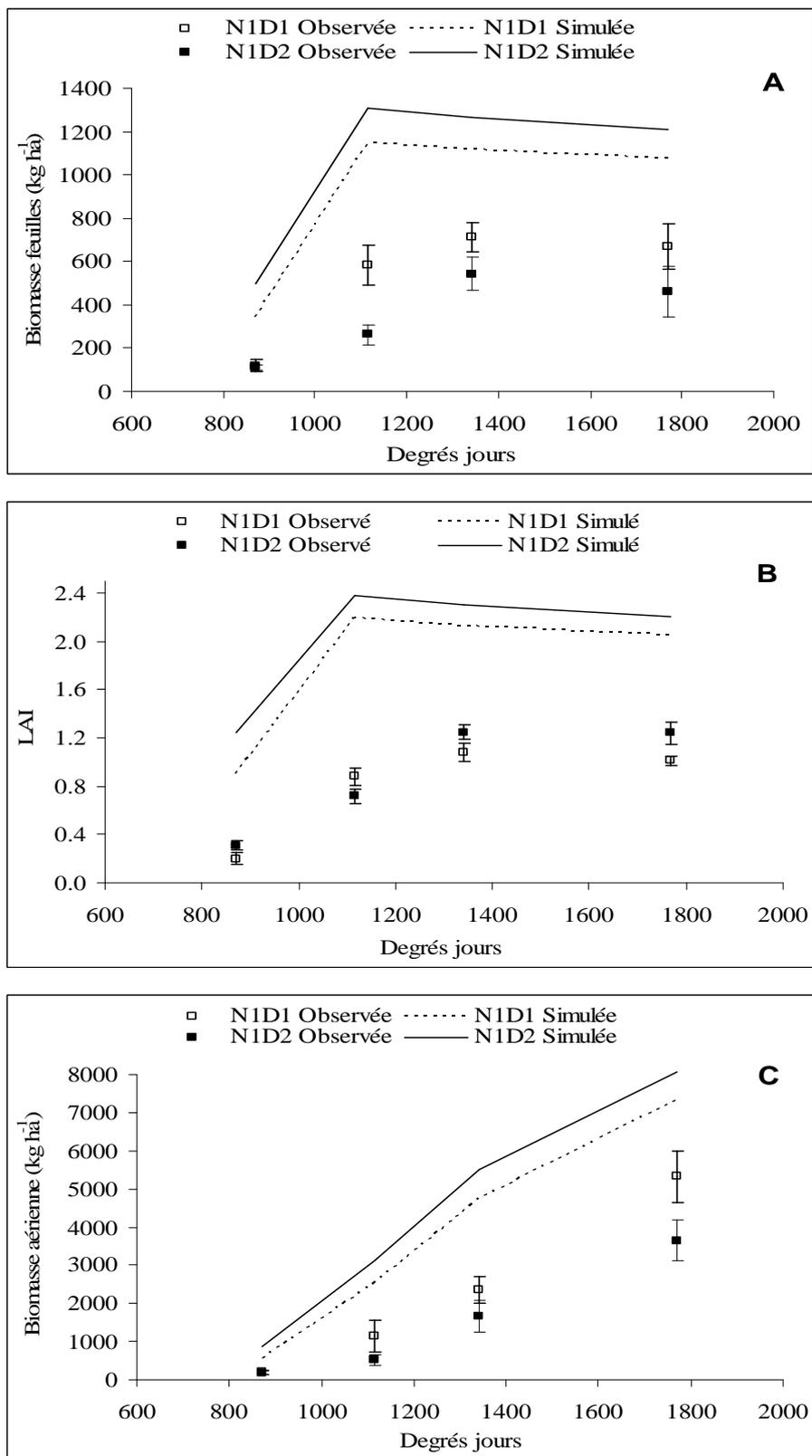


Figure 107 : Résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2003.

Le modèle a aussi été validé pour les résultats obtenus avec la même variété de mil ZATIB, dans le cadre de l'essai « apport d'urée x variétés ». Il est important de rappeler que cet essai a été conduit au CRA, également en 2002 et 2003, mais avec une densité de semis de 20 000 plants ha⁻¹ (intermédiaire entre les deux précédentes : 16666 plants ha⁻¹ et 31250 plants ha⁻¹). Les simulations obtenues ont été meilleures aux précédentes (figures 108A, B et C). Ces figures montrent qu'en 2002, les valeurs simulées ont été inférieures à celles observées, de la levée au 70^e JAS (1200 degrés jours). Cependant, à partir de cette date, les valeurs observées en biomasse et en LAI ont connu une chute importante sous le stress hydrique ayant caractérisé cette saison et dont le modèle a une fois de plus sous-estimé l'impact en maintenant le LAI et la biomasse foliaire à des niveaux élevés jusqu'à la fin cycle (figures 108A et B).

Les données observées en 2003 dans le cadre de ce second essai ont présenté plus d'écarts par rapport aux simulées, comparativement aux résultats de 2002, du fait de la baisse de la fertilité généralisée à toutes les parcelles expérimentales (figures 108A, B et C). En fait, SARRA-H n'a de possibilités de prendre en compte la variation de la fertilité du sol qu'à travers le coefficient de conversion de l'énergie lumineuse (PAR) interceptée (ϵ_b) dont la valeur varie avec le développement de la culture, comme l'ont indiqué Birch *et al.*, (1990). Cependant, la valeur obtenue pour ce coefficient dans des conditions optimales de nutrition hydrique et azotée, n'est pas encore forcément applicable aux sols peu fertiles.

Partant du fait que les variétés photopériodiques de mil prédominent en milieu paysan au Sahel (Vaksmann *et al.*, 1998), les données observées dans le cadre de l'essai « date de semis x variété » ont permis d'évaluer la sensibilité du modèle par rapport à la prise en compte de l'effet du décalage de semis de la même variété de mil ZATIB. En effet, nos résultats expérimentaux ont montré la variation du cycle de cette variété avec la date de semis, et ceci en conformité avec les résultats obtenus par Kouressy *et al.*, (1998) ; Bacci *et al.*, (1998) ; Craufurd et Bidinger (1989) et Kouressy (2007), qui ont montré que, dans les zones soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest, la photopériode agit sur le cycle des variétés sensibles de mil, en le prolongeant lorsqu'elle est longue (semis précoce) et en le raccourcissant lorsqu'elle est courte (semis tardif). Selon ces auteurs, le nombre de feuilles développées et la taille des plants diminuent avec le raccourcissement du cycle et entraînent une baisse souvent significative de la biomasse produite à la récolte, particulièrement celle des pailles. Ce phénomène est pris en compte par le modèle SARRA-H à travers les seuils de cumuls thermiques définis dans le paramétrage de celui-ci et qui contrôlent la durée de chaque stade phénologique de la culture.

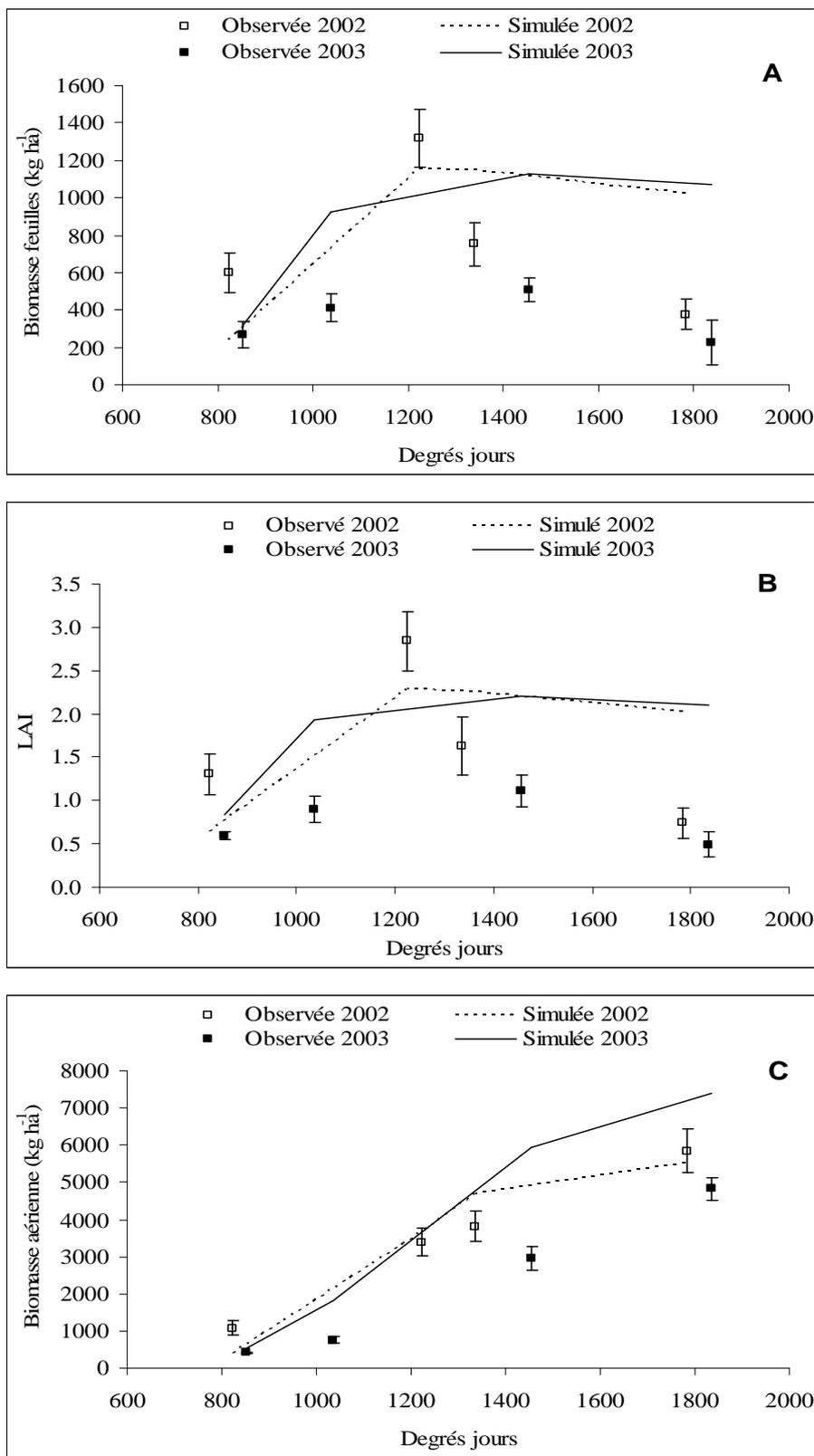


Figure 108 : Résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de 20 000 plants ha⁻¹, sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002 et 2003.

Les résultats obtenus en 2002 avec la variété de mil ZATIB, testée vis-à-vis de l'effet du décalage de la date de semis, ont montré qu'il y a eu un développement foliaire plus important des plants du semis tardif de cette variété, par rapport au semis précoce (figures 109A, B et C). On constate sur ces figures que le modèle SARRA-H a bien pu traduire ce phénomène en accordant également plus de LAI et de biomasse (foliaire et aérienne) aux plants du semis tardif. Cependant, les écarts entre les valeurs observées et simulées, quoique relativement réduits pour les rendements en biomasse aérienne, ont commencé à s'élargir pour le LAI et la biomasse foliaire, à partir de l'avènement du stress hydrique de 2002 (après 1200 degrés jours).

En 2003, les résultats, aussi bien observés que simulés ont évolué conformément aux descriptions de Kouressy *et al.*, (1998) ; Bacci *et al.*, (1998), Craufurd et Bidinger (1989) et Kouressy (2007) (figures 110A, B et C). Cette année, les conditions climatiques ont fait que la saison des pluies a effectivement pris fin dès le 19 septembre, ce qui n'a pas permis aux plants du semis tardif, qui étaient en début épiaison en ce moment, de produire autant qu'en 2002.

Les rendements grains observés et simulés ont évolué presque dans le même sens que la biomasse foliaire, selon les différents tests (densité et date de semis, fertilité du sol) et l'année d'essai (tableau XXV). Ce tableau montre que les résultats simulés ont été plus proches de ceux observés en 2002 qu'en 2003, malgré l'impact du stress hydrique ayant perturbé la croissance des plants et dont le modèle a bien tenu compte. En 2002, les écarts entre les rendements grains simulés et observés sont restés inférieurs à 11 %, excepté le traitement du semis tardif pour lequel le modèle a attribué un rendement grains 53 % plus élevée que celui observé. En effet, la croissance des plants de ce traitement a été freinée par le déficit hydrique de 2002 dont l'impact sur les rendements grains a été sous-estimé par le modèle.

La corrélation entre les résultats observés et simulés de 2003 a été moins bonne, du fait non seulement de la baisse de la fertilité du sol, mais aussi de l'arrêt précoce des pluies ayant réduit le rendement grains observés à seulement 322 kg ha⁻¹. Le modèle a très mal évalué l'impact de cet arrêt précoce des pluies, en attribuant aux plants du semis tardif, les plus affectés par le déficit hydrique, un rendement grain de jusqu'à 1383 kg ha⁻¹, soit une surestimation de 329 % par rapport au rendement observé (tableau XXV). La même discordance a été observée au niveau de la biomasse foliaire, donc du LAI simulé, que le modèle a maintenu élevé (2,19 à 1,5) durant 34 jours après l'arrêt des pluies, pendant que le LAI observé chutait jusqu'à une valeur de 0,3 (figure 110B). Ceci confirme les propos de Sultan (2002) selon lequel, le modèle simule les rendements potentiels sans prendre en compte les réalités du terrain, c'est-à-dire les contraintes du milieu hostiles au bon développement de la culture.

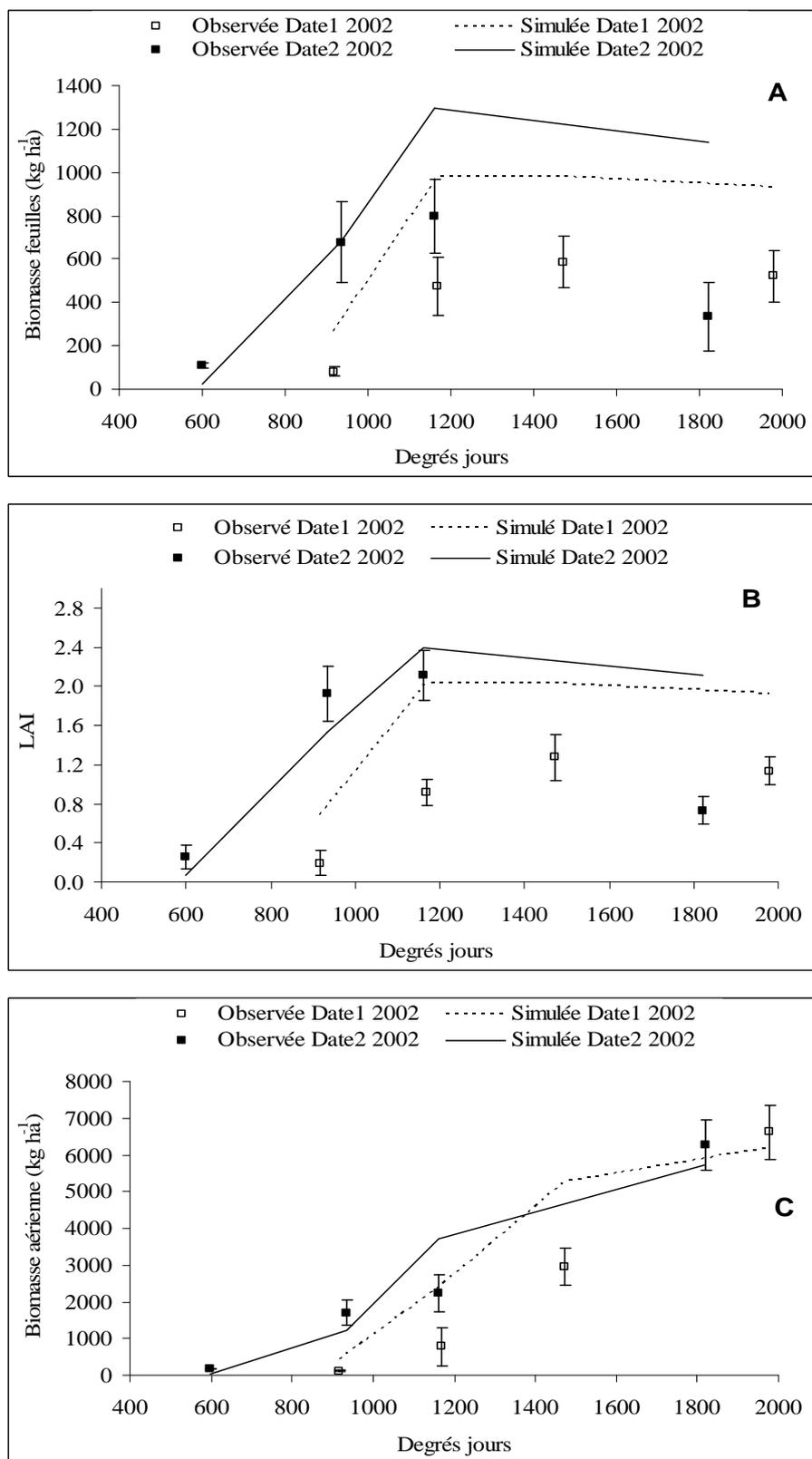


Figure 109 : Résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de 20 000 plants ha⁻¹ à 2 dates différentes (*Date 1 et Date 2*), sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002.

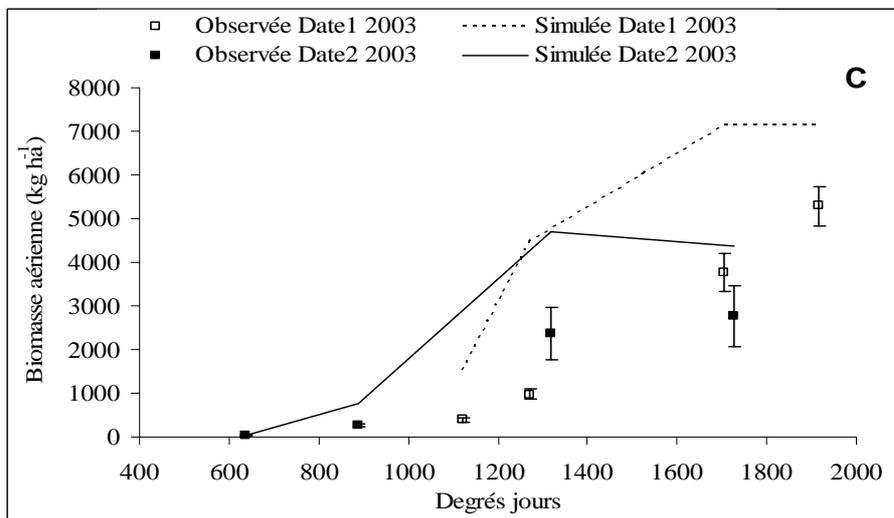
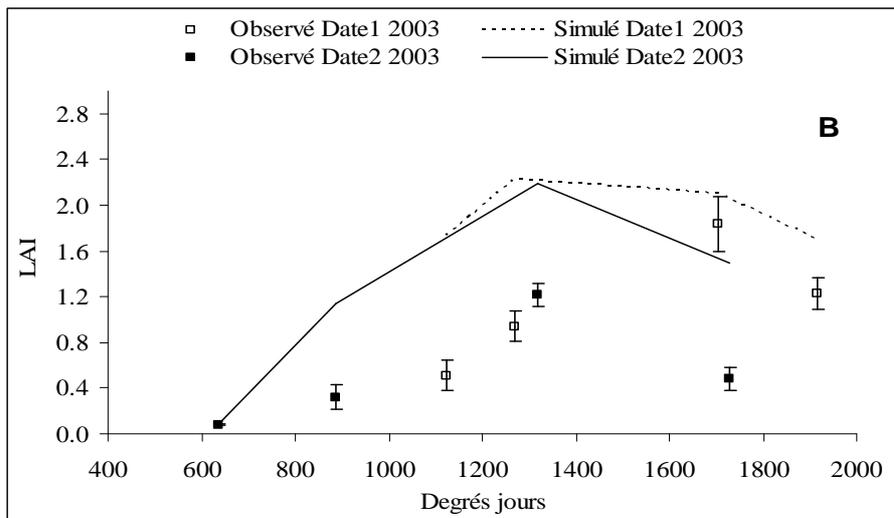
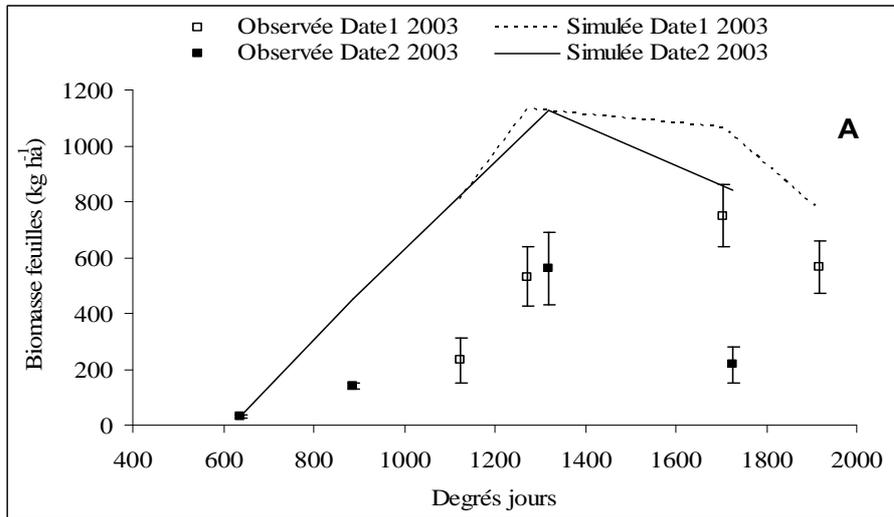


Figure 110 : Résultats simulés et observés en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de 20 000 plants ha^{-1} à 2 dates différentes (*Date 1* et *Date 2*), sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg } ha^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2003.

Tableau XXV : Rendements grains observés et simulés par le modèle SARRA-H en fonction de la densité de semis et de la date de semis, sous des conditions hydriques pluviales strictes et sur un sol modérément fertilisé en urée. Variété de mil ZATIB. Agrhymet, 2002 et 2003.

Année	Date de semis	Densité de semis (plants ha ⁻¹)	Rdt observé (kg ha ⁻¹)	Rdt simulé (kg ha ⁻¹)	Ecart par rapport à l'observé (%)
2002	11-juillet	16666	1243	1250	+ 0,5
	11-juillet	31250	1463	1310	- 10
2003	14-juin	16666	1134	1984	+ 75
	14-juin	31250	1039	2366	+ 128
2002	15-juillet	20000	1553	1502	- 03
2003	17-juin	20000	1593	2004	+ 25
2002	24-juin	20000	1803	1610	- 10
	22-juillet	20000	1264	1936	+ 53
2003	03-juillet	20000	1324	1951	+47
	24-juillet	20000	322	1383	+329

12.3. Ajustement du modèle pour les résultats expérimentaux du CRA

Les simulations obtenues pour les résultats observés des différents essais ont indiqué qu'il était nécessaire d'améliorer le modèle pour une meilleure prise en compte de l'effet du déficit hydrique. Cependant, cet aspect ne sera pas abordé ici, mais fera plutôt l'objet d'une recommandation, à l'intention des développeurs du modèle SARRA-H. Ainsi, seules les imperfections dues à la non prise en compte par le modèle de l'effet de la fertilité du sol sont abordées dans cet exercice d'amélioration de la corrélation entre les rendements simulés et ceux observés. Sur cette base, l'optimisation des simulations a concerné le coefficient de conversion de la lumière en assimilats (ϵ_b) qui est mieux indiqué pour permettre au modèle de tenir compte de l'effet la fertilité du sol sur la croissance de la culture. Dans le calibrage du modèle, fait avec les données recueillies à Bambey, la valeur retenue pour ϵ_b était de $5,0 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$, valeur adéquate pour les résultats obtenus dans les conditions optimales de fertilité du sol. Cette même valeur a été utilisée pour les résultats obtenus en 2002 et 2003 au CRA de Niamey. Des écarts importants ont été obtenus entre les résultats simulés et ceux observés, selon l'année. En effet, en 2002, hormis les irrégularités dues aux insuffisances qu'a le modèle dans la prise en compte de l'effet du déficit hydrique, la valeur $5,0 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ de ϵ_b a été acceptable pour la simulation des rendements des parcelles fertilisées des essais du CRA (figures 106, 108, 109 et tableau XXV). Cependant, avec la baisse de la fertilité résiduelle du sol constatée en 2003, cette valeur de ϵ_b s'est avérée élevée, du fait qu'elle a entraîné une surestimation des sorties du modèle, aussi bien en biomasse feuilles, LAI, qu'en rendements grains. Ceci montre la nécessité de procéder à des jeux d'optimisation des simulations, en essayant de voir avec quelle valeur de ϵ_b les résultats simulés sont en bonne corrélation avec ceux observés, selon le niveau de la fertilité du sol. C'est dans cette optique que nous avons passé en revue les résultats des parcelles insuffisamment fertilisées en 2003, ainsi que ceux des parcelles non fertilisées (témoins) des essais du CRA en 2002 et 2003. Toutefois, les ajustements faits pour la variété ZATIB doivent être repris pour les autres espèces et variétés de céréales, puisque le modèle SARRA-H tient compte de la diversité des espèces et variétés.

12.3.1. Pour la situation de faible fertilité du sol en 2003

L'optimisation des simulations du modèle, selon les résultats réels obtenus par les différents traitements d'urée et de densité de semis, a été possible en procédant à des diminutions graduelles de la valeur du coefficient ϵ_b , de façon qu'il soit plus adapté au niveau de développement foliaire réellement atteint par les plants. Ces ajustements ont permis de forcer le modèle à donner des simulations répondant non seulement à l'effet négatif de la baisse de fertilité du sol, mais aussi à celui de la densité de semis dont l'augmentation diminue significativement le développement des plants sur des sols pauvres.

En effet, avec une valeur de $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$, la différence entre les valeurs simulées et observées en LAI et biomasses (feuille et aérienne) a été moindre avec la faible densité de semis. Avec la forte densité, les écarts sont restés toujours élevés (figures 111A, B et C). Ceci est contraire à ce qui a été observé dans les conditions de culture à Bambey, où avec le régime hydrique ETM, la biomasse foliaire et les rendements grains obtenus avec les deux densités de semis ont été très proches des sorties du modèle. Ceci montre que le modèle n'a pas tenu compte de l'effet de l'interaction entre la densité du semis et la fertilité du sol. Cependant, en ramenant la valeur de ϵ_b à $4,3 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$, la correspondance a été mieux établie entre les valeurs observées et simulées en biomasses feuille et aérienne des plants de la forte densité de semis (figures 112A, B et C), même si par ailleurs quelques inadéquations sont demeurées au niveau de la variable LAI à cause probablement des erreurs de mesure (figure 112B).

Les résultats du second essai, mené sur la même variété semée à $20\,000 \text{ plants ha}^{-1}$ et soumise à l'effet de l'urée en 2002 et 2003, montrent qu'en 2002, hormis l'effet de l'épisode sec survenu à partir du 70^e JAS (1200 degrés jours), le niveau de fertilité du sol a permis aux plants d'avoir un développement et des rendements assez proches des sorties du modèle, pour la même valeur de ϵ_b ($5,0 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$) retenue pour les conditions de culture à Bambey (figures 113A, B et C). Cependant, avec la baisse de la fertilité du sol en 2003, il a fallu ramener cette valeur de ϵ_b à $4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour obtenir des valeurs simulées en biomasse et LAI plus proches de celles observées (figures 113A, B et C). Quant à la biomasse foliaire et au LAI, ils ont présenté des écarts assez larges vers la fin du cycle (figures 113A et B). Ceci s'explique par le fait que le modèle a retardé la sénescence foliaire alors qu'en réalité celle-ci a été accélérée en 2002 par l'épisode sec survenu vers le 70^e JAS (1200 degrés jours), et en 2003 par l'arrêt définitif des pluies vers le 90^e JAS (1600 degrés jours).

Ce même constat a été fait avec les résultats du test de la même variété ZATIB par rapport à l'effet de la date de semis. En effet, pour la même valeur de $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$, le modèle a sous-estimé la sénescence foliaire de fin de cycle chez les plants de la 2^e date de semis de 2003 (figures 114A et B). Or, cette année les plants du 2^e semis de cette variété ont été affectés, vers la fin montaison, par un déficit hydrique fatal dû à l'arrêt précoce des pluies au 57^e JAS (1030 degrés jours). Cependant, ce déficit hydrique n'a pas affecté les plants du 1^{er} semis qui, au contraire, ont donné des valeurs observées en biomasses (feuille et aérienne) et en LAI similaires aux sorties du modèle, pour la même valeur de $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ (figures 114A, B et C). En définitive, hormis le cas particulier de la 2^e date de semis en 2003, les sources de variations ainsi évoquées n'ont pas empêché d'avoir des valeurs simulées en rendements grains proches des valeurs observées, en faisant varier la valeur de ϵ_b . Toutefois, il demeure encore des cas où les écarts sont toujours très élevés (tableau XXVI).

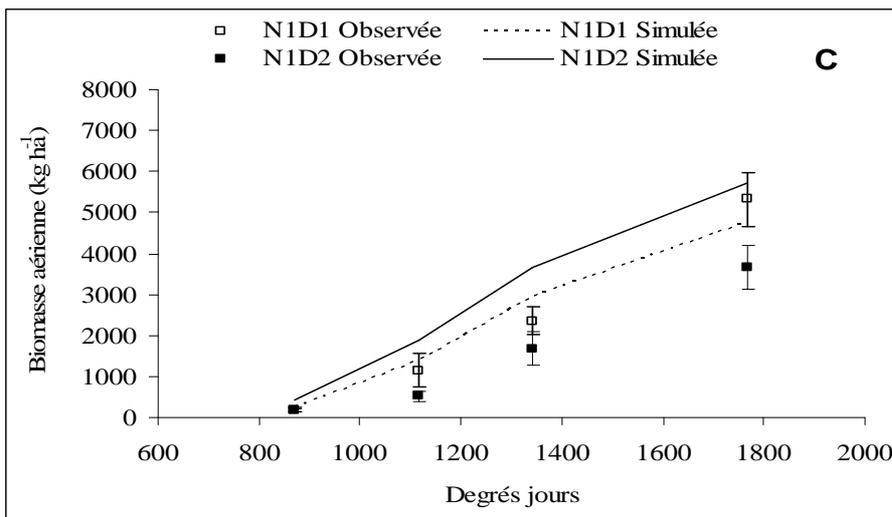
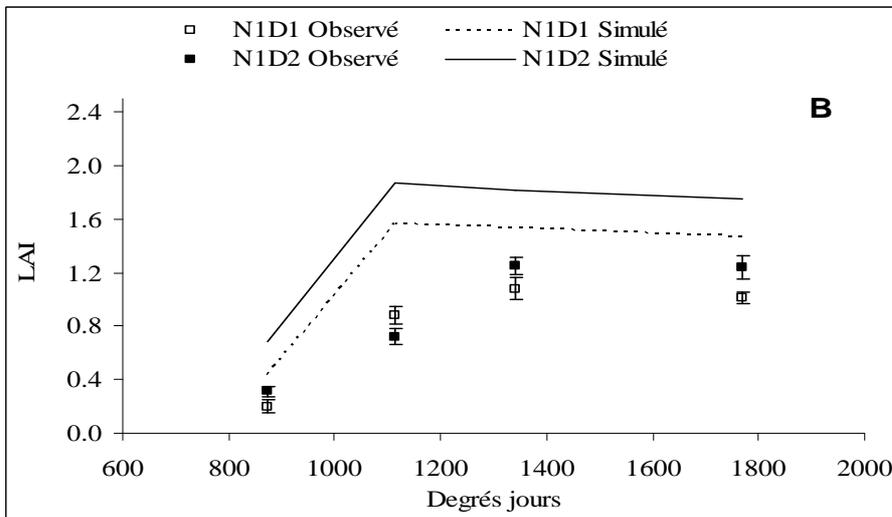
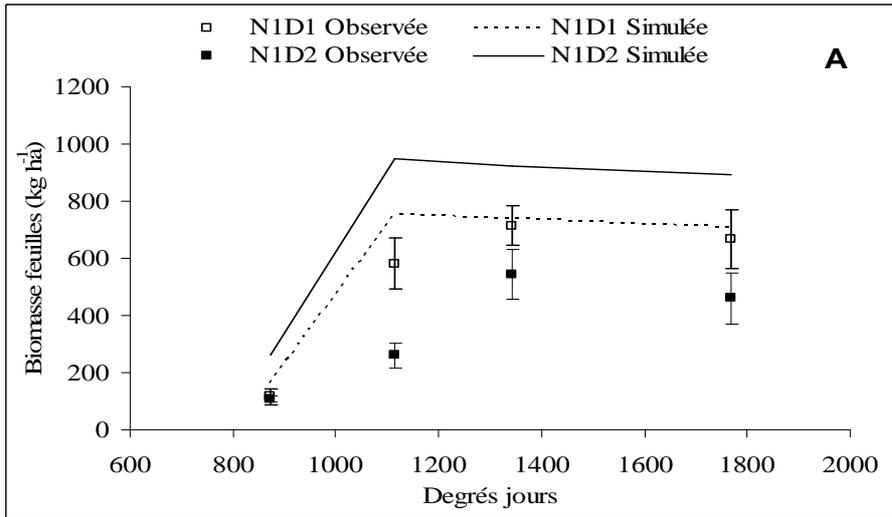


Figure 111 : Résultats observés et simulés (ajustés avec $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$) en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2003.

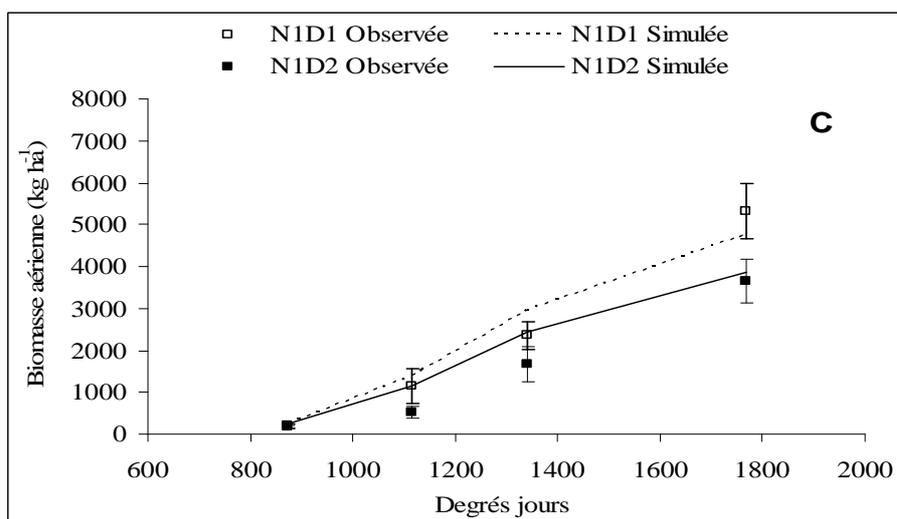
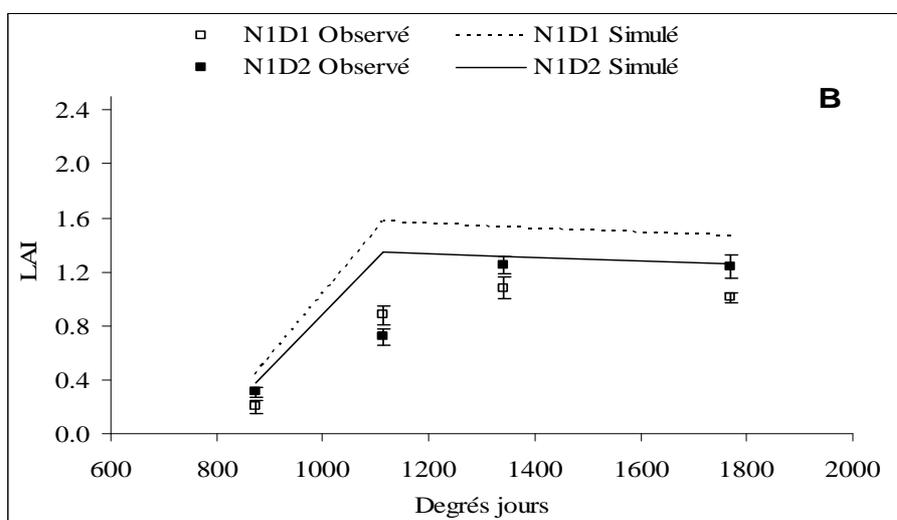
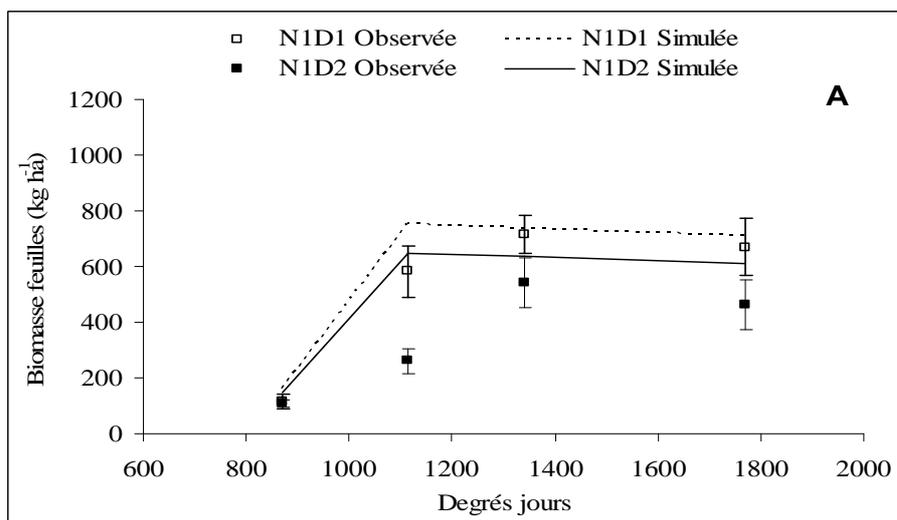


Figure 112 : Résultats observés et simulés (ajustés avec $\epsilon_b = 4,3 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$) en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis ($D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$), sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2003.

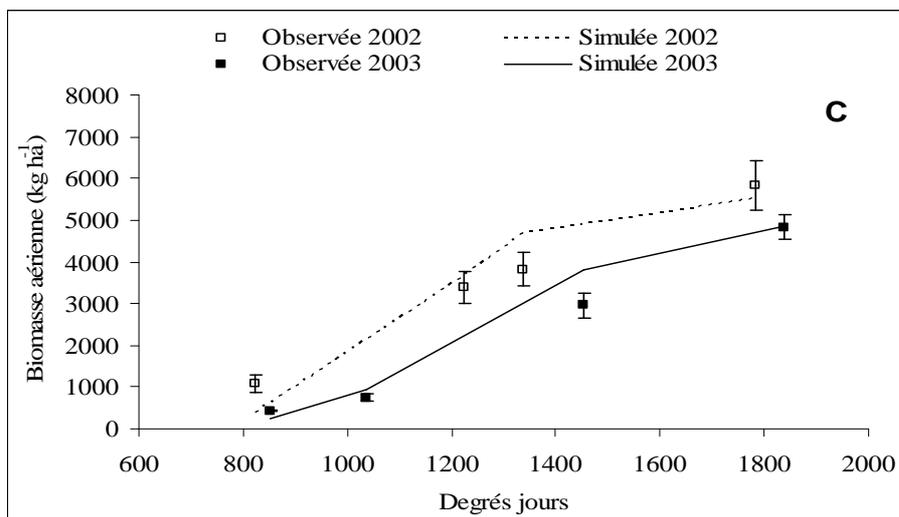
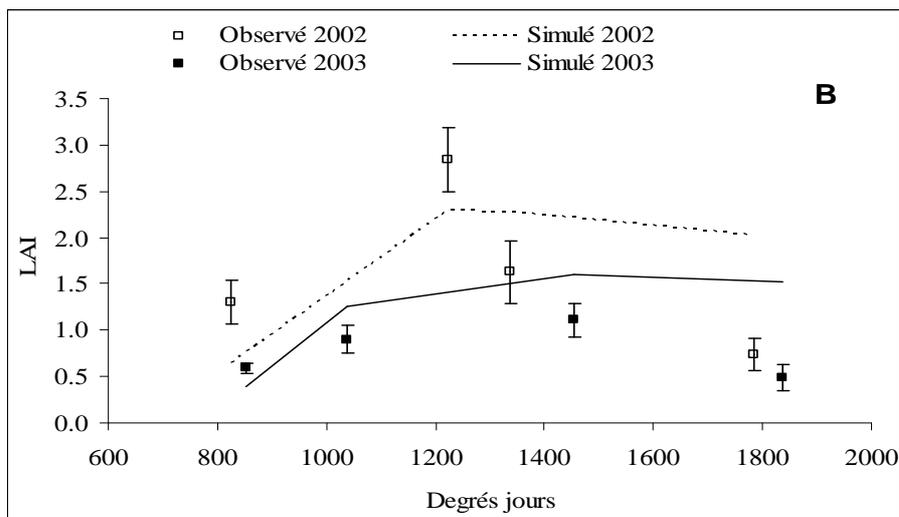
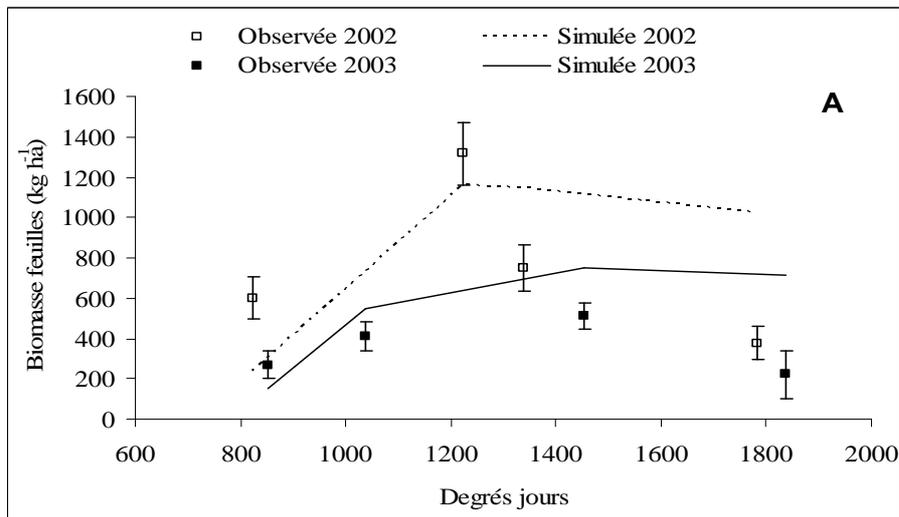


Figure 113 : Résultats observés et simulés (ajustés avec $\varepsilon_b = 5 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2002 et $4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2003) en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de $20\,000 \text{ plants ha}^{-1}$, sous un régime hydrique pluvial strict et sur un sol modérément fertilisé en urée ($N1 = 100 \text{ kg ha}^{-1}$). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002 et 2003.

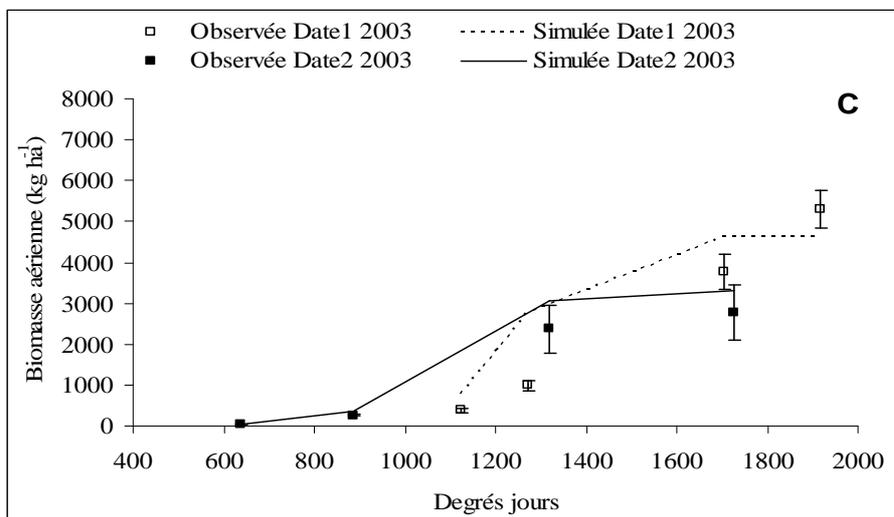
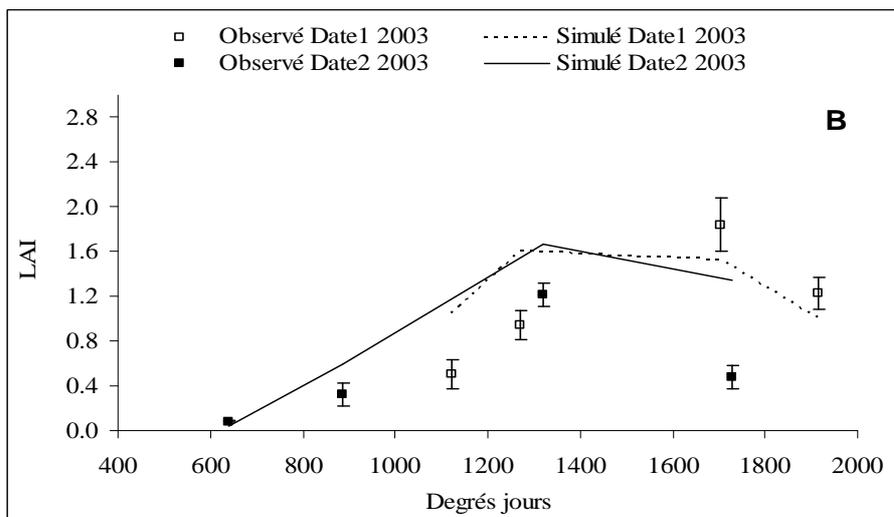
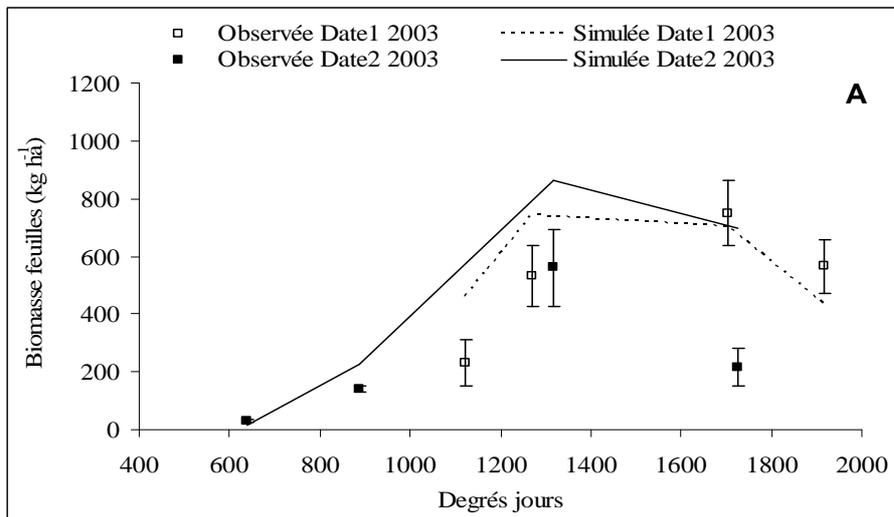


Figure 114 : Résultats observés et simulés (ajustés avec $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$) en biomasse feuille (A), LAI (B) et biomasse aérienne (C) de la variété de mil ZATIB semée à $10\,000 \text{ plants ha}^{-1}$ et à 2 dates différentes (*Date 1* et *Date 2*). Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2003.

Tableau XXVI : Optimisation (avec ϵ_b) des rendements grains simulés par rapport à ceux observés sous les effets de la densité et de la date de semis, en conditions hydriques pluviales strictes et sur un sol modérément fertilisé en urée. Variété de mil ZATIB. Agrhymet, 2002 et 2003.

Année	Date de semis	Densité (plants ha ⁻¹)	Valeur de ϵ_b (g MJ ⁻¹ j ⁻¹)	Rdt observé (kg ha ⁻¹)	Rdt simulé (kg ha ⁻¹)	Ecart par rapport à l'observé (%)
2003	14-juin	16 666	4,6	1134	1181	+ 04
	14-juin	31 250	4,6	1039	1548	+ 48
	14-juin	31 250	4,3	1039	991	- 04
2003	17-juin	20 000	4,6	1593	1203	- 24
2003	03-juillet	20 000	4,6	1324	1167	- 12
	24-juillet	20 000	4,6	322	1065	+ 230

12.3.2. Pour les parcelles non fertilisées en urée

Le jeu d'ajustement des simulations du modèle a été également élargi aux parcelles non fertilisées en urée (témoins). Ainsi, différentes valeurs de ϵ_b ont été obtenues aussi bien pour les deux années que pour les différents traitements de densité de semis (figures 115A et B). Les résultats matérialisés par ces figures ont été obtenus avec des valeurs de $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour la faible densité de semis (D1) et $4,2 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour la forte (D2), en 2002. Cependant, en 2003 il a fallu abaisser ces valeurs à $4,4 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour la faible densité et $4,0 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour la forte, cela du fait de l'effet négatif de la baisse de la fertilité du sol ayant réduit le développement des plants pendant cette saison. Ainsi, pour bien simuler la croissance du mil dans des situations de fertilité du sol aussi diverses que celles abordées dans ce travail, il est nécessaire d'introduire dans le modèle des valeurs de ϵ_b allant de $5,0 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$, pour les sols suffisamment fertiles, à $4,0 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$, pour les sols extrêmement pauvres. En plus, comme le montrent les résultats de cette étude, ces valeurs de ϵ_b doivent être diminuées pour les fortes densités de semis en situation de faible fertilité du sol, afin de tenir compte de l'effet de la compétition vis-à-vis des éléments nutritifs que provoque l'augmentation du nombre de plants dans la parcelle.

La sensibilité du niveau de développement de la culture à ϵ_b a été confirmée par les résultats donnés par la même variété semée en 2002 et 2003 à une densité de $20\,000 \text{ plants ha}^{-1}$ sur un sol également non fertilisé (figure 116). En effet, pour avoir une correspondance acceptable entre la biomasse aérienne observée et celle simulée, il a fallu utiliser des valeurs de ϵ_b de $4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2002 et $4,5 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2003, pour que le modèle tienne compte de la diminution d'environ 220 kg ha^{-1} de rendement grains provoquée par la baisse de la fertilité de sol en 2003 (tableau XXVII).

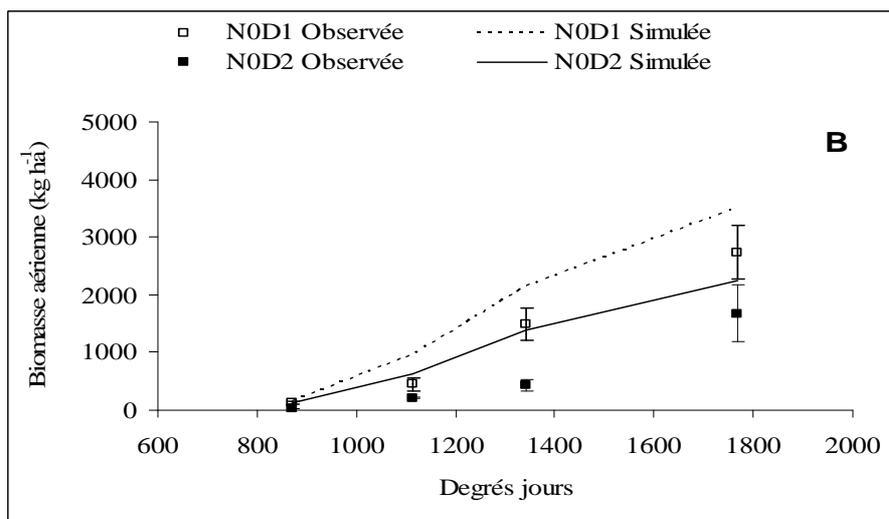
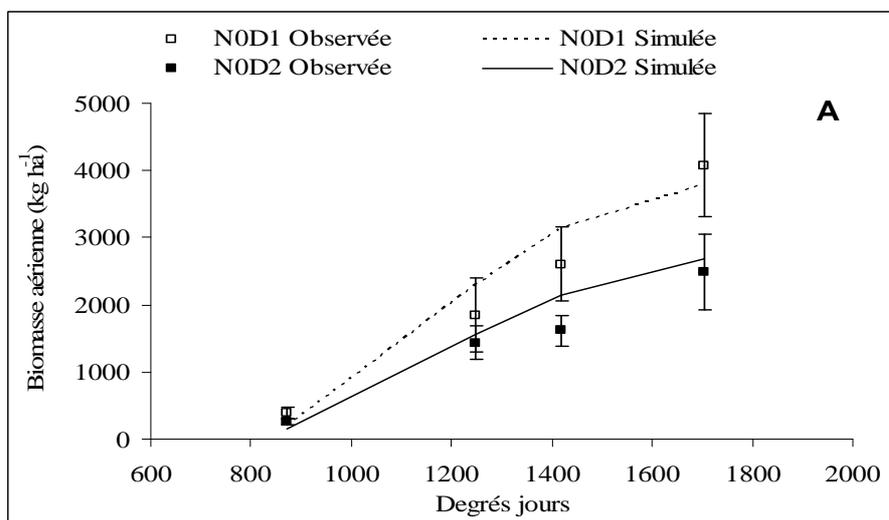


Figure 115 : Biomasse aérienne observée et simulée (ajustés avec $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour N0D1, $4,2 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour N0D2 en 2002 et $4,2 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour N0D1, $4,0 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ pour N0D2 en 2003) de la variété de mil ZATIB semée aux densités $D1 = 16666 \text{ plants ha}^{-1}$ et $D2 = 31250 \text{ plants ha}^{-1}$ sur un sol non fertilisé en urée (N0) et sous un régime hydrique pluvial strict. Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002 (A) et 2003 (B).

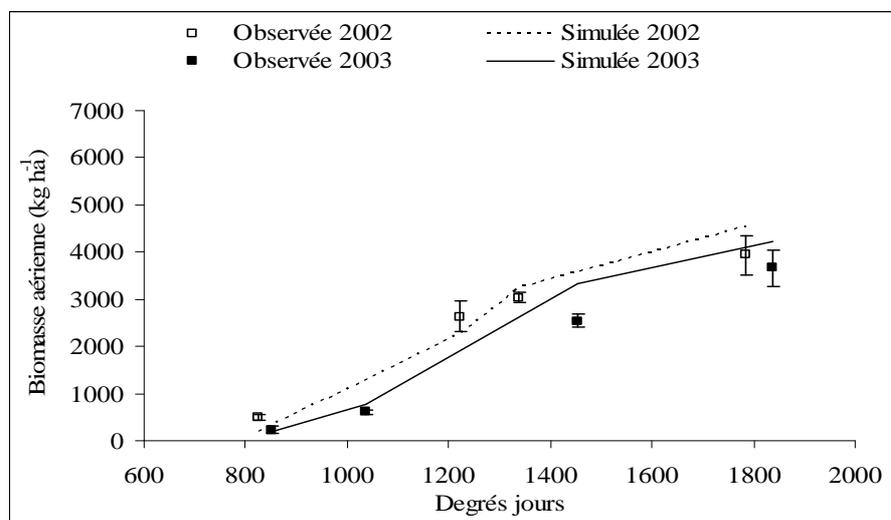


Figure 116 : Biomasse aérienne observée et simulée (ajustés avec $\epsilon_b = 4,6 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2002 et $4,5 \text{ g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en 2003) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de $20\,000 \text{ plants ha}^{-1}$ sur un sol non fertilisé en urée (N0) et sous un régime hydrique pluvial strict. Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les valeurs observées. Agrhymet, 2002 et 2003.

Tableau XXVII : Ajustement (avec ϵ_b) des rendements grains simulés par rapport à ceux observés sous les effets de la densité, en conditions hydriques pluviales strictes et sur un sol non fertilisé en urée. Variété de mil ZATIB. Agrhymet, 2002 et 2003.

Année	Date de semis	Densité (plants ha^{-1})	Valeur de ϵ_b ($\text{g MJ}^{-1} \text{ j}^{-1}$)	Rdt observé (kg ha^{-1})	Rdt simulé (kg ha^{-1})	Ecart par rapport à l'observé (%)
2002	11-juillet	16 666	4,6	1088	1017	-06
	11-juillet	31 250	4,2	699	737	+05
2003	14-juin	16 666	4,4	856	841	-02
	14-juin	31 250	4,0	553	558	+01
2002	15-juillet	20 000	4,6	1216	1242	+02
2003	17-juin	20 000	4,5	1036	1026	-01

12.4. Conclusion partielle

En synthèse, le modèle SARRA-H a bien reproduit l'évolution de la biomasse aérienne et les rendements grains de la variété de mil ZATIB, sous tous les traitements de densité de semis et de régime hydrique testés dans des conditions de fertilité du sol non limitantes à Bambey. Toutefois, dans la situation de déficit hydrique, il n'a pas bien tenu compte du fait que le mil devient plus vulnérable au stress hydrique lorsqu'il est semé à forte densité de plants que lorsqu'il est semé à faible densité. Les comparaisons faites entre les valeurs observées et simulées de la FTSW ont montré que c'est surtout pendant les phases phénologiques de la montaison et de l'épiaison le modèle SARRA-H a tendance à sous-estimer la consommation hydrique de la culture. Les mêmes insuffisances ont été observées dans les résultats de la validation du modèle pour les données recueillies au CRA en 2002 et plus particulièrement en 2003, avec la baisse de la fertilité du sol et l'arrêt précoce des pluies qui ont entravé la croissance de la culture et dont le modèle SARRA-H n'a pas tenu compte. Le même résultat a été obtenu par Sultan (2002) qui avait constaté que le modèle SARRA-H simule les rendements potentiels sans prendre en compte les contraintes du terrain, souvent hostiles au bon développement de la culture. En effet, il est important de rappeler que le modèle SARRA-H prend en compte la variation de la fertilité du sol, seulement à travers le coefficient ϵ_b traduisant l'efficience de la conversion de la lumière interceptée en matière sèche, selon le statut de l'azote dans les feuilles de la plante. Sur cette base, la valeur obtenue pour ce coefficient (ϵ_b) dans des conditions optimales de culture, n'est pas forcément applicable aux sols peu fertiles. D'où, il a été défini dans ce travail une série de valeurs de ϵ_b qui ont permis d'ajuster les simulations du modèle par rapport aux résultats expérimentaux observés en fonction de la densité de semis, dans les conditions de faible fertilité du sol au CRA. Ainsi, pour une variété donnée, les résultats de ces ajustements montrent qu'il est possible d'améliorer les capacités du modèle SARRA-H, en lui intégrant des valeurs de ϵ_b définies en fonction de la typologie du sol, en matière de fertilité azotée. Cependant, SARRA-H a bien tenu compte de l'effet du décalage de semis sur la croissance et la durée du cycle de la variété de mil ZATIB (photosensible), ce qui permet de le considérer comme valide pour la prise en compte de l'effet du photopériodisme.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les résultats des différents essais ont montré que la croissance et le développement du mil sont fonction, non seulement des pratiques culturales (choix variétaux, fertilisation azotée, date et densité de semis) et de la disponibilité en eau, mais aussi des facteurs climatiques entrant dans le calcul de l'ETo. Il est ressorti de ces résultats que les variétés précoces (HKP) et semi-précoces (ZATIB) sont les plus indiquées pour mieux mettre en valeur la faible pluviométrie qui caractérise le Sahel. Quant à la variété tardive (MTDO), elle n'arrivait pas à boucler correctement son cycle avant la fin de la saison, ce qui fait que son rendement grains a été plus faible que ceux des deux autres variétés. La variété ZATIB a eu les rendements grains les plus élevés, à tous les niveaux de fertilité du sol. Toutefois, la variabilité interannuelle des conditions climatiques a fait que le rendement grains obtenu en 2003 a été différent de celui obtenu en 2002, dans tous les essais menés au CRA.

L'apport d'urée a eu un effet déterminant sur la consommation en eau du mil à cause de son effet positif sur le développement des plants. Cependant, la croissance des plants, aussi bien en terme de biomasse totale, de surface foliaire que de hauteur, n'est favorisée par l'apport d'urée que quand les conditions hydriques sont favorables. Dès que les conditions hydriques deviennent limitantes, ces mêmes plants dont le développement a été augmenté par l'urée subissent plus l'effet négatif du manque d'eau, avec une croissance plus ralentie et des rendements plus faibles. Quant à la densité de semis, son effet a été perceptible, aussi bien dans les parcelles n'ayant pas reçu d'urée, que dans celles l'ayant reçu et souffrant de déficit hydrique. Ainsi, le désir d'accroître la production du mil par l'augmentation de la fertilité du sol et de la densité de semis comporte un risque élevé au Sahel. En effet, avec l'irrégularité des pluies qui sévit dans cette zone, il est nécessaire de tenir compte de la disponibilité en eau dans le choix des pratiques culturales pour une augmentation de la production du mil. Par exemple, en prévision de l'effet négatif d'une éventuelle insuffisance hydrique au cours du cycle de la culture, il est mieux indiqué de modérer la fertilisation azotée et d'adopter une densité de semis relativement faible pour permettre une meilleure économie de l'eau.

Ceci a été confirmé par les résultats obtenus à Bambey où, pour les mêmes densités de semis qu'au CRA, la variété ZATIB a réagi différemment aux régimes hydriques S1 (stress à la montaison), S2 (stress à la floraison) et ETM (sans stress) auxquels elle a été soumise sur un sol suffisamment fertilisé. En effet, les conditions de culture à Bambey ont permis à cette variété d'avoir des efficacités d'utilisation de l'eau à la fois plus élevées qu'au CRA et différentes selon le régime hydrique et la densité de semis ; la faible densité de semis ayant été plus efficiente que la forte et le régime hydrique S2 moins efficient que les régimes S1 et ETM. Ces résultats s'expliquent par les conditions pédo-climatiques de Bambey ayant permis

à cette variété de produire jusqu'à 3 120 kg ha⁻¹ avec la faible densité de semis associée au régime hydrique ETM, soit le double du rendement potentiel (1 500 à 2 000 kg ha⁻¹) qui lui a été défini au Niger par l'Institut National de Recherche Agronomique du Niger (INRAN).

Ces résultats, ainsi recueillis dans diverses conditions expérimentales, ont été utilisés pour adapter le modèle SARRA-H, avec la variété de mil ZATIB. Calibré avec les résultats obtenus à Bambey dans les conditions optimales d'approvisionnement en eau et de fertilité du sol, ce modèle continuait néanmoins à sous-estimer l'effet du déficit hydrique et celui de la fertilité du sol. Ces limites ont aussi été à la base des insuffisances liées à la prise en compte de l'effet de la date de semis et de la densité de semis que le modèle était pourtant supposé pouvoir gérer. En effet, le modèle a comme principe d'attribuer toujours plus de biomasse et de rendements grains aux parcelles à plus fort nombre de plants. Or, cela ne s'est avéré valable que dans les conditions optimales d'apport d'eau et de fertilité du sol. Nos résultats ont montré que les faibles densités de semis sont plus favorables à la croissance et au développement de la culture que les fortes, lorsque les conditions de culture ne sont pas optimales. Les séries d'ajustement faites, en faisant varier le coefficient de conversion de la lumière en assimilats (ϵ_b), ont permis de corriger les écarts et d'avoir des simulations très proches des valeurs observées selon les traitements et l'année de culture. Les valeurs de ϵ_b retenues, selon la fertilité du sol et la densité de semis, varient de 5,0 g MJ⁻¹ j⁻¹ (pour le sol riche) à 4,0 g MJ⁻¹ j⁻¹ (pour le sol pauvre). Ces ajustements du coefficient ϵ_b peuvent donc être considérés comme moyen de prendre en compte les différents niveaux de fertilité du sol par ce modèle, dans lequel les fonctions relatives à l'apport des fertilisants n'existent pas. Cependant, l'utilisation de ϵ_b , pour corriger l'effet de la densité de semis dans les simulations, n'a paru nécessaire qu'en cas de faible fertilité du sol.

En définitive, il est ressorti de ce travail que le modèle SARRA-H a tendance à ne calculer que des rendements potentiels, hormis l'impact des déficits hydriques dont il tient compte, mais pas suffisamment. Pour réparer ces imperfections, les résultats de ce travail peuvent servir de base de révision des algorithmes de calcul du modèle, afin qu'il tienne compte des contraintes réelles du terrain, comme la baisse de fertilité du sol, le déficit hydrique, la photosensibilité variétale. En outre, les investigations doivent être poussées au-delà des parcelles expérimentales, afin de collecter une gamme de données plus représentatives des réalités du milieu paysan, tant sur le plan pédoclimatique qu'agronomique. Ces données serviront à valider le modèle pour qu'il réponde mieux à la diversité de contraintes (aléas climatiques, dégradation des terres) qui limitent les rendements des cultures au Sahel. En plus, les tests de calibrage et de validation du modèle doivent être étendus à d'autres variétés de mil et à d'autres céréales, afin d'assurer une bonne prévision des rendements, en matière d'alerte précoce pour la sécurité alimentaire au Sahel.

BIBLIOGRAPHIE

- Affholder, F.** 1991. Synthèse des résultats ESPACE Sénégal. In *Rapport de campagne ESPACE, 1990. Vol. 1. AGHRYMET / Coopération française* : PP28-43.
- Affholder, F.** 1994. Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dry land condition. *Field Crops Research*. 41 : 109-121.
- Affholder, F.** 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research*. 52: 79-93.
- Abdulmumin, S. and S. M. Misari.** 1989. Crop coefficients of some major crops of the Nigerian semi - arid tropics. *Department of Soil Science, Institute for Agricultural research, AHMADU BELLO University, P. M. B. Zaria (Nigeria). Agricultural water management, 18 (1990):* 159-171.
- Agossou, M. A. B.** 2004. Paramétrage, calage et étude de validité d'un modèle de croissance et de productivité du sorgho (*Sorghum bicolor (L.) Moench*). *Mémoire de DEA en biologie végétale ; Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar.* 41p.
- Alagarswamy, G.; D. M. Reddy and G. Swaminathan.** 1998. Duration of the photoperiod-sensitive and -insensitive phases of time to panicle initiation in sorghum. *Field Crops Research*. 55: 1-10.
- Allen, G. R.; L. S. Pereira; D. Raes and M. Smith.** 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO, Irrigation and drainage. Paper 56,* 301p.
- Al-Kaisi, M. ; L. J. Brun and J. W. Enz.** 1989. Transpiration and evapotranspiration from maize as related to leaf area index. *Agric. For. Meteorol., 48:111-116.*
- Al-khatib, K and G. M. Paulsen** 1999. Hight-Temperature effects on photosynthetic processes in temperate and tropical cereals. *Crop physiology & Metabolism. Crop Sci.* 39, 119-125.
- Amadou, M. et L. K. Fussel.** 1987. Croissance et développement d'une gamme de variétés de mil ; *Mémoire de Maîtrise ès Sciences Agronomiques : ICRISAT – Faculté d'Agronomie de Niamey.* 44p.
- Amadou, M.,** 1994. Analyse et modélisation de l'évaporation-transpiration d'une culture de mil en région aride sahélienne. *Thèse Doc. en science de l'Université Paris XI ORSAI. N° d'ordre : 3490 ;* 106p.
- Amadou, M. ; P. Cellier ; B. A. Monteny et J. P. Lhomme.** 1994. Estimation de l'évapotranspiration d'une culture de mil à l'aide d'un modèle de couvert épars. *X^e journées hydrologiques tenues en septembre 1994, ORSTOM – Montpellier.* 143-161.
- Amoukou, A. I. and L. Marchais.** 1993. Evidence of a partial reproductive barrier between wild and cultivated pearl millet (*Pennisetum glaucum*). *Euphytica* 67: 19-26.
- Annandale, J. G. and C. O. Stocle.** 1994. Fluctuation of crop evapotranspiration coefficients with weather : a sensitivity analysis. *Irri. Sci.* 15p. : 1-7.
- Annerose, D. et B. Cornaire.** 1991. Premiers acquis du CERAAS sur la physiologie de l'adaptation à la sécheresse de quelques espèces cultivées. *Séminaire International. Gestion Agroclimatique des précipitations. Une voie de réduction du « gap technologique » de l'agriculture tropicale africaine. Bamako, 9-13 décembre 1991.* 25p.
- Anonyme.** 1991. Etude des besoins en eau de la culture de mil sur dispositif lysimétrique. *Rapport Technique de la campagne agricole 1990. Projet pilote Niger – Italie / PNUD / OMM, Niamey, Niger.*

- Anonyme.** 1993. L'agrométéorologie du mil (*Pennisetum glaucum* (L) Leeke). *Rapport commission de météorologie agricole (CMAg) N° 56, OMM/ TD N° 566, Genève, septembre 1993. 124p.*
- Anonyme.** 1998. Rapport annuel sur l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse (CERAAS). *Les bases-centres.*
<http://www.coraf.org/secretariat/docmts/rapann98/rapann98-10.html#coraf>.
- Anonyme.** 2002. Modélisation de la croissance et de la productivité des cultures céréalières mise au point d'un SIG pour l'amélioration des systèmes de prévisions agricoles au Sénégal. *Rapport technique du Fonds National de Recherches Agricoles et Agroalimentaires (FNRAA), Avril 2002, 25p.*
- Avissar, R. ; P. Avissar ; Y. Mahrer and B. A. Bravdo.** 1985. A model to simulate plant stomatal to environmental conditions. *Agric. Forest. Meteo, 34: 21-9.*
- Azam-Ali, S. N ; P. J. Gregory and J. L. Monteith.** 1984. Effects of planting density on water use and productivity of pearl millet (*Pennisetum typhoides* H. and S.) grown on stored water: water use, light interception and dry matter production. *Exp. Agric.* 20: 215-224.
- Bacci, L.,** 1994. Utilisation des modèles de production dans les stratégies agrométéorologiques de la culture du mil. *OMM, Direction de la météorologie nationale du Niger. Ce. S.I.A.-accademia dei Georgofili-Italie. Florence, 133p.*
- Bacci, L. ; C. Cantini ; F. Pierini and G. Maracchi.** 1998. Effects of agronomics practices on growth, development and yield of a short day cultivars of millet and their agronomic consequences in Mali. In Reyniers F – N. et BACCI, L eds. *Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride. Florence : PP31-44.*
- Bagayoko, M.; A. Buerkert ; G. Lung ; A. Bationo and V. Römheld.** 2000. Cereal/legume rotation effects on cereal growth in sudano-Sahelian West Africa: soil mineral nitrogen, mycorrhizae and nematods. *Plant and soil* 218: 103-116.
- Baron, C. ; F. Reyniers ; A. Clopes et F. Forest.** 1999. Applications du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques. *Agriculture et développement, 24, 89-97.*
- Baron, C. et M. Dingkuhn.** 2003. Modélisation menée par l'équipe Ecotrop, Cirad-amis, France. Présentation à l'atelier de formation tenu du 24-28 novembre 2003 à Montpellier sur le modèle SARRA-H ; Exemple du mil. CD-R.
- Begg, J. E. and G. W. Burton.** 1971. Comparative study of 5 genotypes of pearl millet under a range of photoperiods and temperatures. *Crop Sci., 11: 803-805.*
- Begue, A.** 1991. Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiométriques : cas d'un couvert discontinu : le mil. *Thèse de doctorat, Université de Paris VII, UFR de Physique. 139p.*
- Begué, A.; J. F. Desprat; J. Imbernon and F. Baret.** 1991. Radiation use efficiency of pearl millet in the sahelian zone. *Programme Climat-plante-production IRAT/DRN Montpellier, France. Agriculture and forest meteorology, 56 (1991) 93-110.*
- Ben Mohamed, A. ; N. Van Duivenbooden and S. Abdoussallam.** 2002. Impact of climate change on agricultural production in the Sahel-part 1. Methodological approach and case study for millet in Niger. *Climatic Change 54 : 327-348.*
- Ben Salam, M.** 1988. Etudes comparatives de la résistance à la sécheresse de quelques variétés de blé. *Thèse Doc. d'Etat es-sciences Univ., Paris VII, Centre de Jussieu, 379P.*
- Ben Salam, M. et J. P. Vieira Da Silva.** 1991. Polymorphisme variétal de résistance à la sécheresse chez les céréales à paille : Cas du blé. *NOUREDDINE C. & YVES D.; l'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Actualité Scientifique : ed. AUPELF – UREF. John Libbey Eurotext. Paris 1991. 225P.*

- Bernard, E. A.** 1956. La détermination de l'évapotranspiration dans la culture. *Etude des aspects géophysiques et écologiques du problème dans le cadre du bilan énergétique. Public. INEAC, N° 68.*
- Birch, J.** 1990. Development and evaluation of a sorghum model based on CERES- Maize in semi-arid tropical environment. *Field Crops Research*; 24 : 87-104.
- Bley, J.** 1990. Experimentelle und modellanalytische untersuchungen zun wasser- und nährstoffhaushalt von perlhirse (*Pennisetum americanum* L.) in sudwest-Niger. *Dissertation. Universitat Hohenheim.* 132p.
- Blum, A.** 1982. Evidence for genetic variability in drought resistance and its implications for plant breeding. In : drought resistance in crops with emphasis on rice :. *International rice research institute (Los Banos, Laguna, Philippines).* PP 53-68
- Boubacar, B. I.** 1985. Suivi de la croissance et du développement d'une gamme de variétés de mil (*Pennisetum typhoides*) dans les conditions pluviométriques de l'Ouest Nigérien. Rapport de stage, *ICRISAT / Niamey juin 1985.* 46p.
- Bousnina, H. et A. Mhiri.** 1997. Amélioration de la réserve d'eau utile des sols sableux des régions arides par un amendement argileux. *Etude originale ; Sécheresse, 8 (4).* 241-6.
- Brisson, N.; B. Seguin and P. Bertuzzi.** 1992. Agro meteorological soil water balance for crop simulation models. *Agric. For. Meteorol., 59:267-287.*
- Brun, L. J.; E. T. Kanemasu and W. L. Powers.** 1972. Evapotranspiration from soybean and sorghum fields. *Agron. J., 64:* 145-148.
- Brutsaert, W.** 1982. Evaporation into the atmosphere, Theory, History and Applications. *Reidel, Boston.* 151p
- Buerkert, A. ; P. R. Lawrence ; J. H. Williams and H. Marschner.** 1994. Non-destructive measurements of biomass in millet, cowpea, groundnut, weeds and grass swards using reflectance, and their application for growth analysis. *ICRISAT Journal Article N° 1525, Niamey / Niger. Expl. Agric. (1995), vol. 31,* 1-11.
- Buerkert, A.; A. Bationo and H-P. Piepho.** 2001. Efficient phosphorus application strategies for increased crop production in sub-Saharan West Africa. *Field Crops Research* 72 : 1-15.
- Cantini, C.** 1995. Manuel d'exercices sur le développement, la croissance et la production des plantes. *Ecophysiologie, Manuel technique Ce.S.I.A. N° 13 – 1995. Ce. S.I.A.-accademia dei Georgofili-Italie.* 100P.
- Cantini, C. ; F. Pierini ; L. Bacci ; G. Maracchi.** 1998. Méthodes pour la mesure de la transpiration du mil à chandelle : Application à une variété photopériodique pour l'évaluation des effets de la fertilité et de la date de semis sur l'efficacité de la transformation. In *REYNIERS F-N. et BACCI, L eds. Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride. Florence :* PP 45-57.
- Carberry, P. S. and L. C. Campbell.** 1985. The growth and development of pearl millet as affected by photoperiod. *Field Crops Res.* 11p : 207-217.
- Charoy, J. ; F. Forest et J. C. Legoupil.** 1983. Estimation fréquentielle des conditions d'alimentation hydrique en culture pluviale et irriguée. *Bilan hydrique, IRAT ; CIEH ;* 183p.
- Chopart, J. L.** 1980 Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (Arachide – mil – sorgho – riz pluvial) ; *Thèse de Doctorat, INPToulouse,* 162p.
- Chopart, J. L.** 1983. Etude du système racinaire du mil (*Pennisetum typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal. *Agron. Trop., 18 (1) :* 37- 46.
- Chopart, J. L. et D. Kone.** 1994. Fluctuation de l'alimentation hydrique du maïs en région centre. In eds. *F. N. REYNIERS et L. NETOYO, Bilan hydrique Agricole et Sécheresse*

en Afrique Tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture ? Actes Sem. Int. Bamako, Mali, décembre 1991. J. LIBBEY, Paris, pp 39-47.

- Cisse, L.** 1986. Etude des effets d'apport de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du centre-nord du Sénégal. *Thèse. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy*, 184p.
- Coaldrake, P. D. and C. J. Pearson.** 1985. Development and dry weight accumulation of pearl millet as affected by nitrogen supply. *Field Crops Research*, 11: 171-184.
- Cobley, L. S.** 1965. An introduction to the botany of tropical crops. *Longmans Green and Co.Ltd. London*. P. 1-115.
- Cocheme, J. and P. Franquin.** 1967. A study of the agroclimatology of semi-arid area south of the Sahara in west Africa. *Paris : FAO-UNESCO* ; 325p.
- Cortier, B. ; G. Pochier. et J. Imbernon.** 1988. Le maïs au Sénégal : effet des techniques culturales et des conditions hydriques en cultures pluviales. *Agron. Trop. N°2 vol. 43* : 85-90.
- Coulibaly, A.; D. Sogodogo et S. V. R. Shetty.** 1988. L'intensification des systèmes de culture du mil au Mali. *In : Mil et Sorgho au Mali. Communications présentées au séminaire du 4 au 8 octobre 1988 à Bamako, organisé par l'IER et l'ICRISAT en collaboration avec l'USAID.* 356p.
- Cournac, I.; F. Do et T. Winkel.** 1993. Elaboration d'un modèle de réponse de la croissance et du rendement du mil à un déficit hydrique de fin de cycle : mil-stress. *Rapport interne. Université de Niamey, Institut des radio-isotopes.* 41p.
- Craufurd, P. Q. and F. R. Bidinger.** 1988. Effect of the duration of the vegetative phase on crop growth, development and yield in two contrasting pearl millet hybrids. *ICRISAT, patancheru, p.o., andhra pradesh, 502 324, India* .110p : 71-79
- Craufurd, P. Q. and F. R. Bidinger.** 1989. Potential and realized yield in pearl millet (*Pennisetum americanum (L.) Leeke*) as influenced by plant population density and life-cycle duration. *Fiel Crops Res.* 22: 211-225.
- Craufurd, P. Q. and A. Qi.** 2001. Photothermal adaptation of sorghum (*Sorghum bicolor*) in Nigeria. *Agric. For. Meteorol.*, 108 (3):199-211
- Daamen, C. C. ; L. P. Simmonds and M. V. K Sivakumar.** 1994. The impact of sparse millet crops on evaporation from soil in semi-arid Niger. *Agricultural water management*, 25 (1995). *ICRISAT Sahelien center, Niamey, Niger* : 225-242.
- Dancette, C.** 1971. Contrôle avec l'humidimètre à neutrons de l'alimentation hydrique d'une culture de mil « Souna » pendant deux hivernages très différents. *Agron. Trop.* 26 : 721-735.
- Dancette, C.** 1976. Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau au Sénégal. *Besoins en eau des cultures. Agron. Trop.*, N° 31 : 4-10.
- Dancette, C.** 1978. Besoins en eau et adaptation du mil à la saison des pluies, au Sénégal. *CNRA de Bambey / ISRA. Février 1978* ; 17p.
- Dancette, C.** 1979. Besoins hydriques des cultures pluviales et politique générale de l'eau en agriculture dans les zones Centres et Nord du Sénégal. *Note N°112 AGRHYMET (CILSS), Niamey / Niger.* 21p.
- Dancette, C.** 1983. Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agronomie tropicale, vol.38 - N°4* : 281-294.
- Dancette, C.** 1989. Besoins en eau du mil au Sénégal. Adaptation en zone semi-aride tropicale. *Agronomie tropicale, vol.38 - N°4*: 267-280.
- Dancette, C.** 1991. Critique des recherches sur le bilan hydrique en zone soudano-sahélienne. IAHS publication. Soil water balance in the sudano-sahelian zone: N°199.

In Proceedings of an international workshop held at Niamey, 18-23 february 1991 : pp 45-62.

- Denden, M. et R. Lemeur.** 1999. Mesure de la transpiration par le modèle de Penman-Monteith. *Sécheresse ; 10* : 39-44.
- Denden, M. et R. Lemeur.** 2000. Modélisation de la résistance stomatique en fonction des caractéristiques morphologique et anatomique des stomates, du rayonnement et du potentiel hydrique. *Note Méthodologique, Sécheresse, 11 (1)* : 29-36.
- Denis J. J. ; M. Pfister et A. Ganda.** 1984. Suivi et production des cultures, Campagne 1983, Ferme expérimentale centre Agrhymet. *Division de l'agrométéorologie CILSS-PNUD-OMM. N° 162, 77p.*
- De Rouw A.** 1994. Effet de l'apport de bouses de vache sur la croissance du mil, le développement des mauvaises herbes et l'encroûtement du sol (Niger). *Réunion thématique agronomie-bioclimatologie-ORSTOM-CS4. Montpellier, 6-9 septembre 1994.*
- De Rouw, A.** 2004. Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems* 81 (2004) 73-93.
- Diangar, S. ; A. Fofana ; M. Diagne ; C. F. Yamoah and R. P. Dick.** 2004. Pearl millet-based intercropping systems in the semiarid areas of Sénégal. *African Crop Science Journal*, 12 (2) : 133-139.
- Dingkuhn, M. ; D. E. Johnson; A. Sow and A. Y. Audebert.** 1999. Relation-ship between upland rice canopy characteristics and weed competitiveness. *Field Crops Res.*, 61 79-95.
- Dingkuhn, M.; C. Baron; V. Bonnal; F. Maraux; B. Sarr; B. Sultan; A. Clopes and F. Forest.** 2003. Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. *In Decision support tools for smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: a practical guide. (T.E. Struif Bontkes and M.C.S. Wopereis ed.) IFDC, Muscle Shoals, AL. USA. pp 127-139*
- Diop, M.** 1999. Caractérisation du facteur hydrique en agriculture pluviale au Sénégal : le cas de l'arachide et du mil. *Thèse Doc. de géographie, spécialité : Climatologie. Univ. de Bourgogne, UNRS UPRESA « climatologie de l'espace tropical. 185 P.*
- Diouf, O.** 2000. Réponses agrophysiologiques du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse : influence de la nutrition azotée. *Thèse Doc. en Sciences ; Laboratoire de physiologie végétale et d'agrotechnologies végétales, Faculté des Sciences de l'Université Libre de Bruxelles. 160p.*
- Diouf, O ; Y. C. Brou ; M. Diouf; B. Sarr ; M. Eyletters ; H. Roy-Macauley and J. P. Delhaye.** 2004. Reponse of pearl millet to nitrogen as affected by water deficit. *Agronomie* 24 (2004) 77-84.
- Donald, C. M. and J. Hamblin.** 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Adv. Agron.*, 28 : 361-405.
- Doorenbos, J. and A. H. Kassam.** 1979. Yield response to water. FAO. Irrigation and drainage. *Paper 33, FAO, Rome, 193p.*
- Dulure. M.** 1993. Le minéral, le végétal et le social : du sol à l'homme, en passant par le climat... *In : Dughé et al., Eds. Les démarches de l'unité de recherche GAM (géographie, agronomie et mécanisation) en gestion de la fertilité: concept et application. Montpellier ; CIRAD-SAR : pp 1-15.*
- Eagleman, J. R.** 1971. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agricultural Meteorology. University of Kansas, Kans. (U.S.A), 8: 385-394*
- Egharevba, P. N.** 1981. Contribution, of assimilate from different leaf zones to developing millet grain. *Samaru J. of Agric. Res.*, 10: 27-36

- Eldin, M.** 1991. Analyse des risques de déficit hydrique au cours des différentes phases phénologiques du mil précoce au Niger. Conséquences agronomiques. *ORSTOM, Montpellier, France. 17P : 17-30. Ed. François-Noel, R. et Laomaibao, N., 1994. Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Colloques et congrès, Sciences et Changements planétaires/sécheresse. Univers. Francophones. AUPELF/UREF, 415P.*
- Flesch, T. K. et R. F. Dale.** 1988. Nitrogen argument for corn leaf models. *Agronomy Journal*, vol. 80: 784-789.
- Forest, F.** 1984. Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. *Présentation et utilisation du logiciel BIP. Division Recherche - Développement Economie - Valorisation de l'Eau, Groupe eau, IRAT – CIRAD.* 61p.
- Forest, F.** 1990. La modélisation du bilan hydrique pentadaire pour une meilleure prise en compte des relations climat – sol – culture. *Communication au second atelier du 30 avril au 05 mai 1990 ; PF1 et PF2. R3S parcelle, Bamako, vol. II/III.* 5p.
- Forest, F.** 1991. Intérêts et limites de l'apport de matière organique en zone soudano-sahélienne : effet sur l'alimentation hydrique et sur le rendement des cultures d'arachide et de mil ; *In : Influence du climat sur la production des cultures tropicales ; compte rendu du séminaire organisé par la Fondation Internationale pour la science du 23 au 28 septembre 1991 au Burkina Faso, pp 94-104.*
- Franquin, P.** 1971. Photopériodisme et cycle de végétation. *In Agroclimatology in the semi-arid areas south of the Sahara. Proceedings of the regional conference, Dakar, 8 – 20 February 1971. FAO/ UNESCO / WMO Interagency projet on Agroclimatology. WMO. N° 340 :PP 42-44.*
- Franquin, P.** 1987. Adaptation des mils et sorghos à la photopériode, au parasitisme et à la capacité hydrique du sol. *In Virmani, S. M. and M.V. K. Sivakumar eds. Proceeding of the international symposium: Agro meteorology of sorghum and millet in the Semi-arid Tropics. Pantacheru : ICRISAT, 191-203.*
- Frere, M. et G. F. Popov.** 1979. Surveillance agrométéorologique pour la prévision des récoltes. *Etude FAO : production végétale et protection des plantes, N° 17. Rome. 65P.*
- Frere, M. et G. F. Popov.** 1987. Suivi agrométéorologique des cultures et prévision des rendements. *Etude FAO : production végétale et protection des plantes, N° 73. Rome 169p.*
- Freteaud, D. J. P. ; B. Lidon et S. Marlet.** 1984. La détermination des coefficients culturaux en zones soudano-sahélienne. Proposition d'une méthode générale et pratique. *CIRAD/IRAT, Montpellier, DEVE. ST Clément, France. 19P.*
- Gandah, M.** 1991. Synthèse des études sur le bilan hydrique au Niger. *In: Sivakumar, M. V. K. ; J. S. Wallace; C. Renard et C. Giroux. 1991. Soil water balance in the sudano-sahelian zone. IAHS Public. N°199, 357-361.*
- Ganzin, N.** 1989. Diagnostic hydrique des cultures. *Utilisation du logiciel DHC de suivi opérationnel de campagne agricole. DMN-IRAT/CIRAD, Cellule de diagnostic hydrique des cultures, Programme Agrhymet Niamey financé par la coopération française, CILSS-PNUD-OMM. 33p.*
- Gerard.** 1990. L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux ; collection géographique. Masson, 221p.
- Girard, X., C. Baron, et B. Cortier.** 1994. Logiciel de diagnostic hydrique des cultures DHC4 - Manuel d'utilisation, Centre Régional AGRHYMET, Niamey, Niger, 38p.
- Girard, X.** 1995. Estimation des rendements par DHC4 au Niger. *Note technique, complément au rapport 95/10/DAA/SC/RE. CILSS/PNUD/OMM, programme Agrhymet. 14p.*
- Green, D. G. and D. W. L. Read.** 1983. Water use efficiency of corn, sunflower and wheat with limiting soil moisture. *Can J. plant Sci ; 747-809.*

- Hafner, H.** 1992. Effect of organic and inorganic fertilizer application on growth and mineral nutrient uptake of pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) and groundnut (*arachis hypogaea* L) in an acid sandy soil of Niger. *Grauer verlag, Wendlingen*. 121p.
- Hangmann, J.** 1994. Lysimeter measurement of nutrient losses from a sandy soil under conventional-till and ridge-till in semi-arid Zimbabwe. *Project rapport 10, IAE-GTZ*. 9P : 19 - 27.
- Hector, J. M.** 1936. Introduction to the botany of field crops. *Vol. 1-Cereals, Central News Agency, Johannesburg*.
- Hensen, I. E.; G. Alagarswamy ; F. R Bidinger and V. Mahalakshmi.** 1982. Stomatal responses of pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke to leaf water status and environment factors in the field. *Plant, Cell. et Environ.*, 5 : 65-74.
- Herrmann, L. ; A. Hebel and K. Stahr.** 1994. Influence of soil microvariability on millet growth on sandy sahelian soils. *Z. Pflanzenernar. & Bodenk.* 157 : 111-115.
- Hillel, D.** 1974. L'eau et le sol : principes et processus physiques. *Vander (ed.) Louvain*. 288p.
- Huda A.K.S.** 1987. Simulating of sorghum and pearl millet in the semi arid tropics. *Field Crops Res.* 15 : 309-325.
- Hubert, P.** 1970. Recueil de fiches techniques d'agriculture spéciale. *Tome 1, Agence du B.D.P.A. de Madagascar, 277-296*
- Hulse, J. H. ; E. M. Laing. and O. E. Pearson.** 1980. Sorghum and millet: their composition and nutritive values. *New York, USA: Academic Press, 997p.*
- ICRISAT Sahelian Center.** 1985. Annual report 1984 *Patancheru, AP. 5023^e India ; ICRISAT.*
- ICRISAT Sahelian Center.** 1986. West African programs, annual raport, 1985, *Niamey Niger.*
- IRAT.** 1967. Etude des besoins en eau des plantes cultivées et des méthodes d'irrigation au Niger. Période 1967-1970. Station expérimentale d'hydraulique agricole de Tarna (Niger). *Note de présentation, IRAT 38p.*
- Jara, J.; C. O. Stockle and J. Kjølgaard.** 1998. Measurement of evapotranspiration and its components in a corn (*Zea mays* L.) field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92: 131-145.
- Jean-Louis, K. K.** 1994. Amélioration pour l'adaptation des plantes à la sécheresse : Quelques méthodes d'étude physiologique. *Rapport de stage du 15/09 au 30/09/94. IDEFOR/DPO/MARC DELORME Côte d'Ivoire, CERAAS/ISRA/CNRA de Bambey (Sénégal).* 18p.
- Kalms J. M. et S. Valet.** 1975. Détermination des besoins en eau des cultures vivrières et industrielles dans les conditions pédo-climatiques des terrasses du Niger à Tillabery (hivernage 1972), *IRAT Ronéo. juillet 1975.* 24p
- Kanemasu, E. T.; L. R. Stone and W. L. Powers.** 1976. Evapotranspiration model tested for soybeans and sorghum *Agron. J.*, 68: 569-572.
- Kashyap, P. S. and R. K. Panda.** 2001. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural and Food Engineering Department, India Institute of Technology. Agricultural water management* 1648: 1-17.
- Kassam, A. H. and D. J. Andrews.** 1975. Effects of sowing date on growth, development and yield of photosensitive sorghum at Samaru, Northern Nigeria. *Expl., Agric.* ; 11 : 227-240
- Kassam, A. H. and J. M. Kowal.** 1975. Water use, energy balance and growth of Gero millet at Samaru, Northern Nigeria. *Agric. Forest Meteorol.*, 15 : 333-342.

- Kaul, R. and W. L. Growle.** 1974. An index derived from photosynthetic parameters for predicting grain yields of drought stressed wheat cultivars. *Z. PFLANZER, ZUECH* ; 71P.
- Kaushik, S. K. and R. C. Gautam.** 1994. Response of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) to water harvesting, moisture conservation and plant population in light soils. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 64 (12) : 858-860.
- Kiniry, J. R.; C. A. Jones; J. C. O'Toole ; R. Blanchet ; M. Cabelguenne and D. A. Spanel.** 1989. Radiation use efficiency in biomass accumulation prior to grain –filling for five grain-crop species. *Field Crops Res.* 20: 51-64.
- Klaij, M. C. and G. Vachaud.** 1992. Seasonal water balance of sandy soil in Niger, cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements. *Agri. Water management*, 21 : 313-330.
- Koné, D.** 1990. Zonage du risque de sécheresse par le bilan hydrique des cultures. Rapport d'avancement au 31/03/1990 ; Note Technique N° 21/90 Syst. DCV- IDESSA / RCI ; Communication à l'atelier du 30 avril au 05 mai 1990 ; PF1 et PF2. R3S parcelle, Bamako, vol. II/III. 7p.
- Koné, D., S.B. Traoré et M. Vaksman.** 1992. Le calcul de l'évapotranspiration potentielle selon la formule de Penman (utilisation du logiciel SANJI). *Note technique n°4, IER, Projet Sol Eau Plante, Bamako, Mali.* 15p.
- Kouressy, M. ; O. Niangodo M. Vaksman et F. N. Reyniers.** 1998. Etude de la variabilité phénologique du mil du Mali et de son utilisation pour l'amélioration variétale. In *Reyniers F – N. et BACCI, L eds. Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride.* Florence : pp 59-75.
- Kouressy.** 2007. Adaptation agro-écologique et potentialité des sorghos photopériodiques à paille courte au Mali. *Thèse Doc. En physiologie du Développement et Adaptation des plantes. Ecole Doctorale de SIBAGHE, Université Montpellier.* 161p
- Labo, M.** 1992. Caractérisation, analyse et simulation de rendement du mil en milieu paysan : cas de Kouré / Niger. *Mémoire de fin d'étude d'ingénieur en agrométéorologie. AGRHYMET / Niamey.* 94p.
- Lambert, C.** 1983. Influence de la précocité sur le développement du mil (*Pennisetum typhoides* : *Stapf et Hubbard*) en conditions naturelles. I- Elaboration de la touffe. *Agro. Tropicale* 38 (1) : 16-26.
- Laouan, F. Z.** 1996. Aspects agrométéorologiques de l'association mil / niébé dans l'Ouest du Niger. *Mémoire de fin d'étude d'Ingénieur en Agrométéorologie, Centre AGRYMET, Niamey / Niger.* 106p.
- Lawson, T. L. and M. V. K. Sivakumar.** 1991. Climatic constraints to crop production and fertilizer use. *Kluwer academic Publishers. The Netherlands. Fertilizer Research* 29: 9-20.
- Maïdoukia, A.** 1980. Facteurs limitants et rendement potentiel d'une culture de mil. Mémoire d'ingénieur des travaux en agrométéorologie ; *AGRHYMET, CILSS_PNUD_OMM.* 58p.
- Maracchi, G. ; L. Bacci ; C. Cantini and M. T. Haimanot.** 1992. Effects of water deficit in vegetative and post-flowering phases on pearl millet grown in controlled environment. *Agr. Med., (en presse).*
- Marchais, L.** 1994. Wild pearl millet population integrity in agricultural sahelian areas. *An example from Keita. Pl. Syst. Evol.* 189: 233-245.
- Marshall B. and Willey R. W.** 1983. Radiation interception and growth in an inter-crop of pearl millet/groundnut. *Field Crops*, 7 : 141-160.
- Mason, S. C.** 2001. Cropping systems to optimise yield, water and nutrient efficiency of pearl millet. *Project UNL-123, University of Nebraska. In: INTSORMIL, Sorghum/*

- Millet collaborative Research Support Program (CRSP); 2001 annual report: pp 49-55.*
- McIntyre, B. D. ; D. J. Flower and S. J. Riha.** 1993. Temperature and soil status effects on radiation use and growth of pearl millet in a semi-arid environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 66: 211-227.
- McPherson, H. G. and R. O. Slatyer.** 1973. Mechanisms regulating photosynthesis in *Pennisetum typhoides*. *Aust. J. Biol. Sci.*, 26 : 329-39.
- Mohamed, H. A.; J. A. Clark and C. K. Ong.** 1988a. Genetic differences in the temperature responses of tropical crops. I. Germination characteristics of groundnut (*Arachis hypogea* L.) and pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). *J. export. Bot.*, 39 (205) : 1121-1128.
- Mohamed, H. A.; J. A. Clark and C. K. Ong.** 1988b. Genetic differences in the temperature responses of tropical crops. III. Light interception and dry matter production of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). *J. Exp. Bot.*, 39 (205) : 1137-1143.
- Mohsen, B. ; B. H. Moncef et S. Lazhar.** 1999. Adaptation et stabilité du rendement de trois espèces céréalières dans les régions semi-arides et sub-humides de la Tunisie. *Sécheresse Vol 10, N°4 1999 ; 273-279.*
- Monteith, J. L.** 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.*, 9: 747-766.
- Monteith J. L.; A. K. S. Huda and D. Midya.** 1989. RESCAP : a ressource capture model for sorghum and Pearl millet. *In Modelling the growth and the development of sorghum and Pearl Millet. ICRISAT, Research Bulletin, N° 12., pp. 30 – 34*
- Munro, D. S.** 1989. Stomatal conductance and surface conductance modelling in a mixed wet land. *Forest. Agric. Meteo*, 48 : 235-49.
- Nouri, M. ; K. C. Reddy et M. Gandah.** 1989. Utilisation de l'eau par le mil et niébé en culture pure et associée ; *In : Berrada, A., Mahaman, I. et Gandah, M., : Les actes du séminaire national sur l'aménagement des sols, la conservation de l'eau, et la fertilisation ; Tahoua (Niger) 20 – 24 février 1989. pp 97 – 102.*
- Nouri, M.** 2001. Water supply effect on pearl millet grain and stover yield (PH. D. Thesis). *In : INTSORMIL, Sorghum/ Millet collaborative Research Support Program (CRSP); 2001 annual report: pp 49-55.*
- Ong C. K and J. L. Monteith.** 1984. Response of sorghum and pearl millet to drought stress in semi-arid India. *Agrometeorology of sorghum and millet in the semi-arid tropics. In: Proceedings of the international symposium. ICRISAT Center, Patancheru, India, 15-20 novembre. pp 159-174.*
- Ong, C. K. and G. R. Squire.** 1984. Response to temperature in a stand of pearl millet (*Pennisetum typhoides* H. and S.), VII. *Final number of spikelety and grains. J. Exp. Bot.*, 34 : 1233-1240.
- Pale, S.** 2001. Planting date and row spacing of pearl millet (M. S. Thesis). *In : INTSORMIL, Sorghum/ Millet collaborative Research Support Program (CRSP); 2001 annual report: pp 49-55.*
- Pandey, R. K. ; J. W. Maranville and Y. Bako.** 2001. Nitrogen fertilizer response and use efficiency for tree cereal crops in Niger. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 32 (9 & 10), 1465-1482.
- Paul, M.** 1981. Nutrition et métabolisme. *Physiologie végétale. 2^{ème} tirage corrigé, éd. Hermann, janvier 1981. 349p.*
- Payne, W. A. ; C. W. Wendt and R. J. Lascano.** 1990. Root zone water balances of three low-input millet fields in Niger, west Africa. *Agron. J.* 82: 813-819.

- Pearson, C. J. and G. A. Derrik.** 1977. Thermal adaptation of *Pennisetum*: leaf photosynthesis and photosynthetate translocation. *Aust. J. Plant Physiol.*, 4: 763-769.
- Pearson, C. J.** 1984. Pennisetum Millet, in « *The physiology of tropical Field crops* ». Eds. P. Goldworthy and N. Fisher, Wuly, New York. pp 281-304
- Penning de Vries F. W. T.; D. M. Jansen; H. F. M. Ten Berge and A. Bakema.** 1989. Simulation of ecophysiological. Processes of growth in several annual crops. *PUDOC Wageningen, The Netherlands; and International Rice Research Institute (IRRI), Philippines.* 270p.
- Pieri C.** 1976. L'acidification des terres exondées au Sénégal. *Agr. Trop.*, 3 : 339-368.
- Pieri, C.** 1986. Fertilisation des cultures vivrières et fertilité des sols en agriculture paysanne subsaharienne. *Agr. Trop.* P 41-1
- Pieri, C.** 1989. Fertilité des terres de savanes. *Paris : Ministère de la coopération et CIRAD - IRAT*, 444p.
- Piriaux, M.; L. Bock ; A. Buldgen ; E. Lefort ; P. Steyaert et A. Diagne.** 1997. Influence des conditions climatiques, topographiques et d'intensification sur la fertilité physique et chimique des sols ferrugineux en région sahélo-soudanienne. *Note originale, Sécheresse ; 8 (4) : 247-56.*
- Purceglove, J.** 1972. Tropical crops, monocotyledons. *Wiley, New York.*
- Rachie, K. O. and J. V. Majmouadar.** 1980. Pearl millet University Park, *Pennsylvania, USA: Pennsylvanian State University press.* 307p.
- Rebafka, F-P.** 1993. Deficiency of phosphorus and molybdenum as major growth limiting factors of pearl millet and groundnut on an acid sandy soil in Niger, West Africa. *Hohenheimer Bodenkundliche hefte 9. Universitat Hohenheim.* 155P.
- Reddy M. S. and Willey R. W.** 1981. Growth and resource use studies in an inter-crop of pearl millet/groundnut, *Field Crops Res.* 44: 13-24.
- Reddy, K. C. and P. L. Visser.** 1993. Late planting effects on early versus late pearl millet genotypes in Niger. *Expl. Agric.* 29: 121-129.
- Reyniers, F. N.** 1994. Esquisse d'hydrosystème céréalière soudano-sahélien valorisant les précipitations. *Reyniers, F.N. et L. Netoyo, eds., Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale, Science et Changements planétaires - Sécheresse*, 79-89.
- Rijks, D.** 1971. Measurement and calculations of solar and net radiation. In: *Agroclimatology in the semi-arid areas south of the Sahara. Proceedings of the regional conference, Dakar, 8 – 20 february 1971. FAO / UNESCO / WMO, Interagency projet on Agroclimatology. WMO. N° 340. PP 42-44.*
- Roger, C.** 1984. Agriculture, techniques, métiers. *Bordas Encyclopédie.* 184P.
- Rosenberg, N. J.** 1982. The role of the meteorologist and climatologist in improving food production capabilities in the semi-arid regions. In: *Virmani, S. M. et M. V. K. Sivakumar. 1984. Agrometeorology of sorghum and millet in the semi-arid tropics. Proceedings of the international symposium, ICRISAT Center Patancheru, India 15-20 November 1982.* 322p.
- Rosenthal, W. D.; E. T. Kanemasu; R. J. Raney and L. R. Stone.** 1977. Evaluation of an evaporation model for maize. *Agron. J.*, 69: 461-464.
- Samba, A.** 1998. Les logiciels DHC de diagnostic hydrique des cultures : Prévision des rendements du mil en zones soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, 4, 281-288.
- Samba, A. ; B. Sarr; C. Baron; E. Goze; F. Maraoux; B. Clerget et M. Dingkuhn.** 2001. La prévision agricole à l'échelle du sahel. In: *Malézieux, E., G. Trébuil et M. Jaeger (Eds.), Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision. CIRAD et INRA, Montpellier, France, pp 243-262.*

- Sangaré, A.** 1999. Contribution à l'étude d'un modèle d'établissement de l'indice de la surface foliaire d'une variété locale photopériodique de sorgho (*Sorghum bicolor* L Moench). *Mémoire de fin d'études IPR/IFRA de Katibougou*. 48P.
- Santens, P.** 1976. Agriculture spéciale : le Mil. *IPDR de Kollo / MDR Niger*. 54P
- Santens, P.** 1979. Les grandes cultures sahéliennes. Tome I, le Mil. *reproduction du cours d'agronomie offert par l'auteur à l'IPDR de Kolo, Niger, N°103*, 22p.
- Santens, P.** 1985. Agriculture spéciale, *fascicule 1 – Le mil, IPDR Kollo, Niger. Nouv. Ed.* 54p.
- Sarr, B.** 1997. Etude des relations consommations hydriques et productivité chez la variété de mil Souna III (*Pennisetum glaucum* (Leeke) R. Br.) cultivée au champ sous différentes conditions d'alimentation en eau. *Rapport d'activité Ceraas/Isra*, 16p.
- Sarr B. ; S. Ndjendole ; O. Diouf ; M. Diouf; H. Roy-Macauley.** 1999. Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert de maïs au Sénégal. *Sécheresse* 10, 129-135.
- Sarr, B. ; O. Diouf ; M. Diouf ; H. Roy-macauley et C. Brou.** 2001. Utilisation des paramètres agronomiques comme critères de résistance à la sécheresse chez trois variétés de Niébé cultivées au Sénégal et au Niger. *Note de recherche, Sécheresse*, 12 (4) : 256-66.
- Saxton, K. E. ; W. J. Rawls; J. S. Romberger et R. I. Papendick.** 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Amer.* 50 (4):1031-1036.
- Siband, P.** 1981. Croissance, nutrition et production du mil (*Pennisetum typhoides*, Hubbard et Tapf). Essai d'analyse du fonctionnement du mil en zone sahélienne. *Thèse Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier*, 302p.
- Siband, P.** 1983. Essai d'analyse du fonctionnement du mil (*Pennisetum typhoides*) en zone sahélienne. *Agron. Trop.* 38 (1): 27-36.
- Sivakumar, M. V. K.** 1986. Soil-climatic zonation for West African semi-arid tropics-implications for millet improvement. *Presented at the regional pearl millet workshop, sep. 1986, Niamey, Niger*.
- Sivakumar, M. V. K.** 1989a. Agro climatic aspects of rain fed agriculture in the sudano-sahelian zone. *Conference paper N° CP 410 ; proceedings of an international workshop, 7-11 Jan 1987. ICRISAT Sahelian Center, Niamey, Niger Pantancheru, A. P. 502 324, India: ICRISAT.* 22p.
- Sivakumar, M. V. K.** 1989b. Exploiting rainy season potential from the onset of rains in sahelian zone of West Africa. *ICRISAT Sahelian Center, Niamey, Niger. Agricultural and Forest Meteorology*, 51 (1990) : 321-332.
- Sivakumar, M. V. K. and J. L. Hatfield.** 1990. Spatial variability of rainfall at an experimental station in Niger. *ICRISAT Sahelian Center Niamey, Niger. Theoretical and Applied Climatology*, 42: 33-39.
- Sivakumar, M. V. K.** 1992. Climate change and implication for agriculture in Niger. *ICRISAT Sahelian Center. Climati Change* 20:297-312.
- Sivakumar, M. V. K.; A. Manu; S. M. Virmani and E. T. Kanemasu.** 1992. Relation between climate and soil productivity in the tropics. *Myths and Science of soils of the tropics. SSSA Special publication N° 29.* 27: 91-118.
- Sivakumar, M. V. K.** 1993. Global climate change and crop production in the sudano-sahelian zone of west Africa. *ICRISAT Niamey, Niger. Printed in International Crop Science I. Crop Science Society of America, 677S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. Chapter 32:* 251-255.

- Sivakumar, M. V. K. and S. A. Salaam.** 1994. A wet excavation method for root/shoot studies of pearl millet on the sandy soil of the Sahel. *ICRISAT Sahelian Center, Expl. Agri.* (1994), Volume 30 : 329-336.
- Soegaard, H. and E. Boegh.** 1993. Estimation of evapotranspiration from a millet crop in the Sahel combining sap flow, leaf area index and eddy correlation technique. *Institute of geography, University of Copenhagen, Denmark. Journal of hydrology* 166 (1995) : 265-282.
- Sogodogo, D et S. V. R. Shetty.** 1991. Besoins agronomiques des géotypes de sorgho sous condition de culture pluviale au Mali. In : *Menyonga, J. M.; T. Bezuneh; J. Y. Yayock ; I. Somana.* 1991. *Progress in food grain research and production in semi-arid Africa. Proceedings of the SAFGRAD Inter-Network Conference held at the « Palais des congrès ». Niamey, Niger, 7-14 March, 1991 ; pp 297-308.*
- Some, L.** 1990. Caractérisation des risques de sécheresse en zone soudano-sahélienne. *Communication au second atelier du 30 avril au 05 mai 1990 ; PF1 et PF2. R3S parcelle, Bamako, vol. II/III. 35P.*
- Squire, G. R. ; P. J. Gregory and J. L. Monteith.** 1984. Control of water use by pearl millet (*Pennisetum typhoides H. e. S.*). *Exp. Agric.*, 20 : 135-149.
- Squire, G. R. ; C. K. Ong and J. L. Monteith.** 1987. Crop growth in semi-arid environments. *ICRISAT center, India. Patancheru : 219-231.*
- Sultan, B.** 2002. Etude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Applications à la sensibilité des rendements agricoles. *Thèse de doctorat à l'Université Paris 7-Denis Diderot, UFR GHSS. 283 P.*
- Swindale, L. D.** 1982. Distribution and use of arable soils in the semi-arid tropics. In: *Managing soil Resources, plenary session papers, transactions of the 12th International congress of soil Science, 8-16 feb. 1982, New Delhi, India.* pp 67-100
- Tanner, C. B. and W. A. Jury.** 1976. Estimating evapotranspiration and transpiration from a row crop during incomplete cover. *Agron. J.*, 65: 239-243.
- The Syngenta Foundation for Sustainable Agriculture.** 2006. Harnessing modern science in Africa to sustain sorghum and pearl millet production for resource poor farmers. www.syngentafoundation.com/millet.html
- Thomas, B. and D. Vince-Prue.** 1997. Photoperiodism in plants. *Academic Press*, 428P.
- Traoré, A.** 1988. Quelques aspects de la fertilisation du mil et du sorgho au Mali. In *Mil et Sorgho au Mali communications présentées au séminaire sur le mil et le sorgho au mali Bamako, 4-8 octobre 1988.* pp 237-251.
- Traoré, S. B. et M. Vaksman.** 1990. Caractérisation des risques de sécheresse en zone soudano-sahélienne. *Communication au second atelier du 30 avril au 05 mai 1990 ; Résultats du Mali. PF1 et PF2. R3S parcelle, Bamako, vol. II/III.*
- Traoré, S. B. ; M. Vaksman et O. Niangado.** 1995. Réponse à la photopériode de trois variétés de sorgho au Mali. In: *Groot J. J. et A. Coulibaly eds. Les Modèles de simulation de la croissance végétale comme outils de recherche de développement. Wageningen : pp 67-75.*
- Traore, S. B.** 1999. Growth and water relation of Bt and non-Bt corn plants subjected to soil moisture stress. *Thesis of doctorate. Iowa State University, Ames Iowa.* 131p.
- Traoré, S. B; E. C. Richard ; D. P. Clinton and E. R. Marlin.** 2000a. Bt and non-Bt maize growth and development as affected by temperature and drought stress. *Agron. j.* 92 : 1027-1035.
- Traoré, S.B. ; F. N. Reyniers ; M. Vaksman ; B. Koné ; A. Sidibé ; A. Yoroté ; K. Yattara et M. Kouressy.** 2000b. Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorgho du Mali. *Sécheresse N°4, Vol. 11,* pp 227-237.

- Traoré, S.B.** 2001. Prise en compte de quelques facteurs de croissance et de développement des mils et sorghos dans la simulation du bilan hydrique et la prévision des rendements au Sahel. *Communication à l'Atelier Régional ; AGRHYMET, Niamey / Niger*. 13p.
- Vachaud, G. and M. C. Klaij.** 1992. Seasonal water balance of sandy soil in Niger, cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements. *Agri. Water Management*, 21 : 313 – 330.
- Vaksmann, M. ; S. B. Traoré et O. Niangado.** 1996. le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et développement*, 9: 13-18.
- Vaksmann, M. ; S. B. Traoré ; O. Niangado ; N. C. Stutterheim et F. N. Reyniers.** 1998. Intensification et plasticité du développement du sorgho. In *Henk, B. et S. Keffing. L'intensification agricole au Sahel. (AB-DLO, Wageningen et IER, Bamako. Ed. Karthala 22-24, boulevard Arago 75013 Paris : pp 772-780.*
- Valet, S. et C. Albert.** 1976. Etude des relations eau – sol – plantes dans les conditions pédo-climatiques de Tillabery (Niger). *Saison sèche et saison des pluies 1974-75 ; IRAT, Niamey*. 42p.
- Virmani, S. M. and M. V. K. Sivakumar.** 1984. Agrometeorology of sorghum and millet in the semi-arid tropics. *Proceedings of the international symposium. ICRISAT Center Patancheru; India 15-20 November 1982*. 322p.
- Vuong, H. H. et J. C. Selvaraj.** 1988. Proposition des moyens de lutte contre les importantes maladies du mil et du sorgho au Mali. In : *Mil et sorgho au Mali. Communications présentées au séminaire du 4-8 octobre 1988 à Bamako organisé par l'IER et l'ICRISAT en collaboration avec l'USAID : pp265-276.*
- Wallace, J. S. ; J. M. Roberts and M V K. Sivakumar.** 1990. The estimation of transpiration from sparse dryland millet using stomatal conductance and vegetation area indices. *Agric. For. Meteorol.*, 51: 35-49.
- Wallace, J. S. ; C. R. Loyd and M. V. K. Sivakumar.** 1993. Measurements of plant and total evaporation from millet in Niger. *Agricultural and Forest meteorology*, 63 : 149-169.
- Whitehead, D.; D. U. U. Okal and F. E. Fasehun.** 1981. Stomatal response to environmental variables in two tropical forest species during the dry season in Nigeria. *J. Applied Ecol.*, 18: 571-87.
- Winkel, T. et F. Do.** 1992. Caractères morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*Pennisetum glaucum (L.) R. Br.*) à la sécheresse. *Agr. Trop.* 46 (4): 339-351.
- Witt, M. D.** 1981. Physiological studies of pearl millet and grain sorghum subjected to high temperature and moisture stress. *PHD, the University of Nebraska. Lincoln, Ann. Arbor, Michigan USA*. 191P.
- Zangré, G. R. et D. Balma.** 1992. Evaluation morphologique d'une collection de mil. *Sci. et Tech.* 20 (1) : 63-75.
- Zongo, J. D.; M. C. Sedego; P. Serémé et G. R. Zangré.** 1988. Synthèse des prospections des mils (*Pennisetum typhoides*, Stapf et Hubbard) au Burkina Faso. In : *Proceedings of regional pearl millet improvement workshop. 15-16 august 1988: IAR, Samaru, Nigeria, ICRISAT Sahelian Center: pp 121-129.*

ANNEXES

ANNEXE 1

Tableau I : Calendrier des opérations culturales de l'essai Date de semis x Variétés en 2002 et 2003.

DATES/ANNEE	OPERATIONS	COMMENTAIRES
21/06/2002 13/06/2003	Piquetage	Délimitation de la parcelle d'essai, des blocs et des parcelles élémentaires.
24/06/2002 03/07/2003	1 ^{ère} date de semis et fertilisation	Semis à la densité de 20 000 plants ha ⁻¹ (1m/1m). Fertilisation à 10g d'engrais (NKP 15-15-15) par poquet (140 kg ha ⁻¹).
29/06/2002 01/07/2003	Premier sarclage	Hilaire manuelle
19/07/2002 18/07/2003	Démariage et repiquage de la 1 ^{ère} date de semis et apport de la 1 ^{ère} tranche d'urée	Démariage et repiquage des poquets manquants à 2 plants/poquet (20 000 plants ha⁻¹). Fertilisation localisée autour des poquets (4 g poquet⁻¹, soit 50 kg ha⁻¹ tranche⁻¹.
22/07/2002 24/07/2003	2 ^e date de semis et fertilisation	Semis à la densité de 20 000 plants ha ⁻¹ (1m/1m). Fertilisation à 10 g poquet ⁻¹ d'engrais (NKP 15-15-15) soit 140 kg ha ⁻¹ .
31/07/2002 02/08/2003	Fertilisation azotée: 2 ^e tranche d'urée pour la 1 ^{ère} date de semis	Localisée par poquets (4 g poquet ⁻¹).
01/08/2002 30/07/2003	Deuxième sarclage	Hilaire manuelle
14/08/2002 16/08/2003	Démariage et repiquage de la 2 ^e date de semis et apport de la 1 ^{ère} tranche d'urée	Démariage et repiquage des poquets manquants à 2 plants/poquet (20 000 plants ha ⁻¹). Fertilisation localisée autour des poquets (4 g poquet ⁻¹ , soit 50 kg ha ⁻¹ tranche ⁻¹)
15/08/2002 01/09/2003	Fertilisation azotée: 2 ^e tranche d'urée pour la 2 ^e date de semis	Localisée par poquets (4 g poquet ⁻¹).
19/08/2003	3 ^e sarclage	Hilaire manuelle
08/10/2002 23/10/2003	Début de la récolte	Les dates de récolte ont été fixées à la maturité complète en fonction des cycles variétaux ou à la mort des plants par stress hydrique de fin de saison: - En 2002, le 08 octobre pour la 1 ^{ère} date et le 28 octobre pour la 2 ^e date de semis de la HKP et la ZATIB et le 02 novembre pour les deux dates de la MTDO. - En 2003, le 23 octobre pour la 1 ^{ère} date la HKP et la ZATIB et le 05 novembre pour la 1 ^{ère} date de la MTDO et la 2 ^e date de semis de toutes les 3 variétés.

ANNEXE 2:

Tableau II : Calendrier des opérations culturales de l'essai Dose d'urée x Variétés en 2002 et 2003

DATES/ANNÉE	OPERATIONS	COMMENTAIRE
29/06/2002	Labour à plat	Tracteur en 2002 mais, en 2003 pas de labour
02/07/2002 17/06/2003	Piquetage	Délimitation de la parcelle d'essai, des blocs et des parcelles élémentaires.
15/07/2002 17/06/2003	Semis et fertilisation	Semis à la densité de 20 000 plants ha ⁻¹ . Fertilisation à 10 g poquet ⁻¹ d'engrais (NKP 15-15-15), soient 140 kg ha ⁻¹ .
07/08/2002 06/07/2003	Premier sarclage	Hilaire manuelle
17/08/2002 08/07/2003	Démariage et Repiquage	Démariage et repiquage des poquets manquants à 2 plants par poquet (20 000 plants ha ⁻¹)
17/08/2002 08/07/2003	Fertilisation azotée : 1 ^{ère} tranche d'urée	Fertilisation localisée autour des poquets, proportionnellement à la dose retenue par hectare pour chaque traitement.
29/08/2002 28/07/2003	Deuxième sarclage	Hilaire manuelle
29/08/2002 05/08/2003	Fertilisation azotée: 2 ^e tranche d'urée	Fertilisation localisée autour des poquets, proportionnellement à la dose retenue par hectare pour chaque traitement.
26/10/2002 26/09/2003	Début de la récolte	Les dates de récolte sont fixées à la maturité complète selon les variétés ou à la mort des plants par stress hydrique de fin de saison : - En 2002, le 26 octobre pour la HKP et la ZATIB et le 02 novembre pour la MTDO ; - En 2003, 26 septembre pour la HKP et la ZATIB et le 23 octobre pour la MTDO.

ANNEXE 3

Tableau III : Calendrier des opérations culturales de l'essai Dose d'urée x Densité de semis, en 2002 et en 2003

DATES	OPERATIONS	COMMENTAIRE
29/06/2002	Labour à plat	Tracteur (pas de labour à plat en 2003)
02/07/2002 14/06/2003	Piquetage	Délimitation de la parcelle d'essai, des blocs, des parcelles élémentaires.
11/07/2002 (pluvial) 14/07/2002 (irrigué) 14/06/2003 (pluvial) 18/06/2003 (irrigué)	Semis et fertilisation	- Semis après rayonnage de la parcelle en mailles de 1,2/1m pour la densité D1 et 0,8m/1m pour D2. - Apport de 10 g d'engrais (NKP 15-15-15) par poquet, soit 140 kg ha ⁻¹
1/08/2002 (pluvial) 2/08/ 2002 (irrigué) 30/06/2003 (pluvial) 03/07/2003 (irrigué)	1 ^{er} sarclage	Pluvial : Hilaire manuelle Irrigué : Houe manuelle
14/08/2002 01/07/2003 (pluvial) 07/07/2003 (irrigué)	Démariage et Repiquage	Les deux opérations sont faites à 2 plants/poquet, soient 16 666 plants ha ⁻¹ pour D1 et 31 250 plants ha ⁻¹ pour D2.
14/08/2002 (pluvial) 19/08/2002 (irrigué) 08/07/2003 (pluvial) 07/07/2003 (irrigué)	Fertilisation azotée : 1 ^{ère} tranche	Fertilisation localisée autour du poquet par proportionnalité à la dose retenue pour chaque traitement.
29/08/2002 (irrigué) 01/08/2003 (pluvial) 06/08/2003 (irrigué)	2 ^e sarclage	- Pas de 2 ^e sarclage en pluvial en 2002. - Sarclage à l'hilaire manuelle en pluvial et a la houe manuelle en irrigué
28/08/2002 (pluvial) 29/08/2002 (irrigué) 06/08/2003 (pluvial) 08/08/2003 (irrigué)	Fertilisation azotée: 2 ^{ème} tranche	Fertilisation localisée autour du poquet par proportionnalité à la dose retenue pour chaque traitement.
21/10/2002 (pluvial) 22/10/2002 (irrigué) 23/09/2003 (pluvial) 24/09/2003 (irrigué)	Récolte	Effectuée à la maturité complète, manuellement à l'aide de couteaux au 101 ^e JAS (pluvial), 99 ^e JAS (irrigué) en 2002 et au 100 ^e JAS (pluvial), 97 ^e JAS (irrigué) en 2003.

ANNEXE 4

Tableau IVa : Analyse de la variance (ANOVA) des rendements en grains des variétés HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis en 2002

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	198886	99443		
Date	1	432896	432896	0,152	NS
Erreur (a)	2	168889	84445		
Variété	2	301512	150756	0,386	NS
Date*Variété	2	916043	458022	0,092	NS
Erreur (b)	8	1120961	140120		
Total	17	3139188			

Tableau IVb : Analyse de la variance (ANOVA) des rendements en grains des variétés HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis en 2003

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	125853	62926		
Date	1	1978756	1978756	0,033	S
Erreur (a)	2	135480	67740		
Variété	2	488418	244209	0,046	S
Date*Variété	2	269446	134723	0,138	NS
Erreur (b)	8	421034	52629		
Total	17	3418986			

Tableau V : Analyse de variance du poids de 1000 grains des variétés HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis en 2003

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	3,6100	1,8050		
Date	1	9,9756	9,9756	0,056	NS
Erreur (a)	2	1,2078	0,6039		
Variété	2	4,0933	2,0467	0,142	NS
Date*Variété	2	2,4711	1,2356	0,276	NS
Erreur (b)	8	6,5022	0,8128		
Total	17	27,8600			

Annexe 4 (suite)

Tableau VIa : Analyse de la variance (ANOVA) des rendements en paille des variétés HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis en 2002

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	1317932	658966		
Date	1	520333	520333	0,327	NS
Erreur (a)	2	626908	313454		
Variété	2	11208266	5604133	0,069	NS
Date*Variété	2	895685	447842	0,747	NS
Erreur (b)	8	11820708	1477589		
Total	17	26389832			

Tableau VIb : Analyse de la variance (ANOVA) des rendements en paille des variétés HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la date de semis en 2003

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	127375	63687		
Date	1	14192608	14192608	0,107	NS
Erreur (a)	2	3621993	1810996		
Variété	2	72600	36300	0,930	NS
Date*Variété	2	1741813	870907	0,233	NS
Erreur (b)	8	3970262	496283		
Total	17	23726651			

ANNEXE 5

Tableau VIIa : Analyse de la variance (ANOVA) des rendements grains des variétés HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la fertilisation du sol en urée en 2002

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	164134	82067		
Urée	1	216164	216164	0,199	NS
Erreur (a)	2	120740	60370		
Variété	2	1229057	614528	0,002	S
Urée*Variété	2	146980	73490	0,239	NS
Erreur (b)	8	341451	42681		
Total	17	2218525			

Tableau VIIb : Analyse de la variance (ANOVA) des rendements grains des variétés de mil HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la fertilisation du sol en urée en 2003

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	361726	180863		
Urée	1	269398	269398	0,185	NS
Erreur (a)	2	136296	68148		
Variété	2	3246940	1623470	0,001	S
Urée*Variété	2	554638	277319	0,120	NS
Erreur (b)	8	794397	99300		
Total	17	5363394			

Tableau VIIIa : Analyse de la variance (ANOVA) des rendements paille des variétés HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la fertilisation du sol en urée, en 2002

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	1371319	685660		
Urée	1	2033472	2033472	0,015	S
Erreur (a)	2	61319	30660		
Variété	2	7527986	3763993	0,001	S
Urée*Variété	2	45903	22951	0,783	NS
Erreur (b)	8	726111	90764		
Total	17	11766111			

Tableau VIIIb : Analyse de la variance (ANOVA) des rendements paille des variétés HKP, ZATIB et MTDO, en fonction de la fertilisation du sol en urée, en 2003

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	10743104	5371552		
Urée	1	17875217	17875217	0,001	S
Erreur (a)	2	24740	12370		
Variété	2	47116657	23558329	0,001	S
Urée*Variété	2	12555122	6277561	0,025	S
Erreur (b)	8	8348765	1043596		
Total	17	96663604			

ANNEXE 6

Tableau IXa : Analyse de variance (ANOVA) des rendements moyens en grains de la ZATIB en fonction de la dose d'urée et de la densité de semis en pluvial strict en 2002.

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	464516	232258		
Urée	1	632870	632870	0,003	S
Densité	1	21325	21325	0,424	NS
Urée*Densité	1	278100	278100	0,021	S
Erreur	6	173747	28958		
Total	11	1570559			

Tableau IXb : Analyse de variance (ANOVA) des rendements moyens en grains de la ZATIB en fonction de la dose d'urée et de la densité de semis en pluvial strict en 2003.

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	197790	98895		
Urée	1	438008	438008	0,095	NS
Densité	1	118117	118117	0,344	NS
Urée*Densité	1	32434	32434	0,610	NS
Erreur	6	671886	111981		
Total	11	1458235			

Tableau Xa : Analyse de variance (ANOVA) des rendements moyens en paille de la ZATIB en fonction de la dose d'urée et de la densité de semis en pluvial strict en 2002.

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	766827	383414		
Urée	1	1390177	1390177	0,029	S
Densité	1	114034	114034	0,444	NS
Urée*Densité	1	159708	159708	0,370	NS
Erreur	6	1018571	169762		
Total	11	3449317			

Tableau Xb : Analyse de variance (ANOVA) des rendements moyens en paille de la ZATIB en fonction de la dose d'urée et de la densité de semis en pluvial strict en 2003.

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	186949	93475		
Urée	1	1461263	1461263	0,046	S
Densité	1	309471	309471	0,293	NS
Urée*Densité	1	2930	2930	0,914	NS
Erreur	6	1396831	232805		
Total	11	3357443			

ANNEXE 6 (suite)

Tableau XIa : Analyse de variance (ANOVA) des rendements moyens en grains de la ZATIB en fonction de la dose d'urée et de la densité de semis en irrigué en 2002.

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	1595780	797890		
Urée	1	698982	698982	0,001	S
Densité	1	783	783	0,848	NS
Urée*Densité	1	81153	81153	0,087	NS
Erreur	6	116759	19460		
Total	11	2493456			

Tableau VIb : Analyse de variance (ANOVA) des rendements moyens en grains de la ZATIB en fonction de la dose d'urée et de la densité de semis en irrigué en 2003.

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	817040	408520		
Urée	1	777710	777710	0,001	S
Densité	1	3769	3769	0,706	NS
Urée*Densité	1	8004	8004	0,585	NS
Erreur	6	144379	24063		
Total	11	1750901			

Tableau XIIa : Analyse de variance (ANOVA) des rendements moyens en paille de la ZATIB en fonction de la dose d'urée et de la densité de semis en irrigué en 2002.

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	5543517	2771759		
Urée	1	2428664	2428664	0,003	S
Densité	1	83086	83086	0,419	NS
Urée*Densité	1	241988	241988	0,189	NS
Erreur	6	661416	110236		
Total	11	8958672			

Tableau XIIb : Analyse de variance (ANOVA) des rendements moyens en paille de la ZATIB en fonction de la dose d'urée et de la densité de semis en irrigué en 2003.

S. VARIATION	DDL	SCE	VARIANCE	Proba.F	Signification
Rep	2	2126283	1063141		
Urée	1	2235202	2235202	0,004	S
Densité	1	155915	155915	0,275	NS
Urée*Densité	1	467	467	0,950	NS
Erreur	6	647954	107992		
Total	11	5165820			