



1859.97

CERAAS
RECULE 20 NOV 1997.....



CR000890

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

Institut Centrafricain de la Recherche
Agronomique
BP 122 Lak. Bangui RCA

Rapport de stage

BESOINS EN EAU ET REPONSES AGROPHENOLOGIQUES DU MAÏS
(*Zea mays L.*) AUX DIFFERENTES CONDITIONS D'ALIMENTATION EN
EAU PAR LA MESURE DE L'ETAT **HYDRIQUE** DU SOL ET DE LA
TEMPERATURE DU **COUVERT**

Présenté par : Sylvain Ndjendolé

Directeur de stage : Dr Harold Roy-Macauley

Maître de stage : Dr Benoît Sarr

CERAAS

BP : 3320 Thiès Escalé
Thiès Sénégal

Tél : 951 49 93 / 94

Tél / Fax : 951 49 95

51 50 03

eraas@syfed.refer.sn

NDJE
ACLAR
890

Du : 15/07 au : 20/11/1997

SOMMAIRE

SOMMAIRE	1
AVANT PROPOS	2
REMERCIEMENTS	3
TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX	4
RESUME	5
INTRODUCTION GENERALE	6
1. MATERIEL ET METHODES	8
1.1. LE SYSTEME EXPERIMENTAL
1.1.1. <i>Localisation et caractéristiques du site</i>	8
1.1.2. <i>Les techniques culturales</i>	10
1.1.3 Le dispositif expérimental.....	10
1.2. LES TECHNIQUES DE MESURE DES PARAMETRES ETUDIES	11
1.2.1. <i>Suivi de l'état hydrique du sol</i>	11
1.2.1.1. La méthode gravimétrique..	11
1.2.1.2 La méthode neutronique.....	11,
1.2.2 <i>Suivi du développement de la culture</i>	13
1.2.2.1 Les mesures agromorphologiques	13,
1.2.2.2 La mesure de l'indice foliaire.....	13
1.2.3 <i>Le suivi de l'état hydrique et de l'indice de stress hydrique de la plante (CWSI)</i>	14
1.2.3.1 La détermination du contenu relatif en eau (CRE) des feuilles..	14
1.2.3.2 Le suivi de la température du couvert végétal.....	14.
2 RESULTATS	16
2.1. ANALYSE DES RESULTATS.....	16
2.1.1 <i>Conditions climatiques de la campagne</i>	16
2.1.2 <i>Dynamique de l'eau dans le sol, alimentation hydrique et développement de la culture</i>	19
2.1.2.1. L'eau dans le sol et la profondeur d'extraction racinaire (PER).....	19
2.1.2.2. Consommation en eau des plantes et niveau de satisfaction des besoins en eau	21.
2.1.3 <i>Effets du stress sur les paramètres de rendement et de développement de la plante</i>	24
2.1.3.1 Sur la croissance en hauteur des tiges24
2.1.3.2 Sur le développement du couvert végétal26
2.1.4 <i>Effets de la sécheresse sur l'état hydrique de la plante</i>26
2.1.4.1. Sur le contenu relatif en eau (CRE).....	.26
2.1.4.2. Sur l'indice de stress hydrique des cultures.....	.27
2.1.4.3 Evolution comparée de l'eau disponible dans le sol et de l'indice de stress hydrique (CWSI).....	.29
2.1.4.4. Relation entre le CWSIcycle et le TSAcycle.....	.29
2.1.4.5. Relation entre le CWSI à la phase floraison/formation des graines et le rendement en grains29
2.1.5. <i>Effets de la sécheresse sur le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau</i>32
2.1.5.1. Effets de la sécheresse sur les composantes de rendement..32
2.1.5.2. Effet de la sécheresse sur le rendement en matière sèche.....	.32
2.1.5.3. Effets du déficit hydrique en phase florale sur le rendement..32
2.1.6. <i>Alimentation hydrique et efficacité d'utilisation de l'eau</i>33
3. DISCUSSION	35
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	38
BIBLIOGRAPHIE	39

AVANT PROPOS

Dans le cadre de la collaboration entre par le CERAAS¹ et les instituts nationaux de recherches agronomiques des pays africains de la sous région, j'ai effectué une mission sous forme de stage de formation à la recherche du 16 juillet au 20 novembre 1997 à Bambey (ISRA²/CNBA³) ancien site du CERAAS. Cette mission fait suite à celle que j'avais effectuée du 15 au 30 août 1996 (voir rapport de mission).

L'objectif de cette mission était de me familiariser avec les concepts, les techniques et les méthodes utilisés dans l'étude de l'adaptation des plantes à la sécheresse. La présente m'a permis de conduire une expérimentation sur une variété de maïs sélectionnée au Sénégal afin d'étudier ses besoins en eau et ses réponses agrophénologiques face au déficit hydrique. A cet effet, j'ai bénéficié de l'expertise et des moyens adéquats (matériels et ressources humaines compétentes) du CERAAS qui m'ont permis de réaliser cette étude.

Ce travail permettra de définir les bases d'une étude comparative des variétés de maïs provenant du Sénégal et de la Centrafrique dans l'objectif de sélectionner celles adaptées aux différentes zones agro écologiques de la Centrafrique. Et aussi, dans une perspective, de réaliser en deux cycles de culture au cours de la même campagne, dans les zones centre et sud de Centrafrique le cultivar de 90 jours ou encore d'introduire dans les régions nord et nord-ouest soumises à des aléas pluviométriques plus importantes, une variété à cycle plus court.

Le présent document fait le point sur l'application des différentes méthodologies et techniques apprises et donne quelques principaux résultats obtenus au cours de cette expérimentation.

¹ Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse

² Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

³ Centre Nord Bassin Arachidier

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier très sincèrement le Docteur Harold ROY-MACAULEY, Directeur du CERAAS et toute son équipe de m'avoir accordé la possibilité d'effectuer ce stage dans de très bonnes conditions.

J'exprime toute ma profonde reconnaissance à mon maître de stage, le Docteur Benoît SARR, chercheur au CERAAS, pour ses conseils et son encadrement scientifique efficace. Au-delà, d'un encadrement scientifique constant et rigoureux, il m'a accordé un soutien moral et m'a réconforté au cours des moments difficiles. Qu'il trouve ici, avec son auguste famille, l'expression de ma profonde reconnaissance.

L'aboutissement de ce travail est aussi l'œuvre du Docteur Macoumba Diouf, et Omar DIOUF, tous chercheurs au CERAAS qui ont allié disponibilité et rigueur scientifique pour le parfaire.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de David BOGGIO, biométricien du CERAAS pour son aide et ses conseils qu'il n'a cessé de m'apporter dans l'analyse des résultats de ce travail.

Je tiens à remercier tout le personnel du CERAAS, en particulier, le service technique, & l'informatique grâce à la main magique de Mademoiselle Couna Sylla pour la mise en forme définitive du document, et la documentation pour leur franche collaboration.

Toute ma profonde reconnaissance va aussi à l'endroit de mes responsables de service en Centrafrique, pour m'avoir donné l'occasion de me former sur les méthodes et techniques utilisées dans l'amélioration de l'adaptation des plantes à la sécheresse. Il s'agit de messieurs Théodore MIANZE, Fidèle NGOUANZE et Samson KOKAMY, respectivement directeur général, coordinateur scientifique et technique, et directeur du département d'appui à la recherche de l'ICRA⁴

Enfin, que toutes les bonnes fois, qui n'ont ménagé aucun effort pour rendre mon séjour agréable au Sénégal, trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

⁴ Institut Centrafricain de la Recherche Agronomique

Table des figures et tableaux

A°) FIGURES :

Figure 1 : Région maïsicole du Sénégal	9
Figure 2 : Plan du dispositif de l'essai	10
Figure 3 : Etalonnage de la sonde à neutrons (Troxler 4300) par gravimétrie	12
Figure 4 : Evolution du différentiel de température entre le couvert et l'air en fonction de la demande évaporative	15
Figure 5 : Conditions climatiques de l'hivernage 1997 à Bambey	18
Figure 6 : Profils hydriques des différents traitements	20
Figure 7a : Evolution de l'évapotranspiration (ETR) journalière	23
Figure 7b : Evolution de du taux de satisfaction des besoins en eau (TSAT)	23
Figure 8a : Croissance en hauteur des tiges de maïs	25
Figure 8b : Vitesse de croissance en hauteur des tiges suivants le régime hydrique	25
Figure 9 : Evolution de l'indice de surface foliaire (LAI)	28
Figure 10 : Evolution du contenu relatif en eau (CRE)	28
Figure 11 : Evolution de l'indice de stress des plantes (CWSI)	28
figure 12 : Evolution comparée de l' ASW et du CWSI	30
Figure 13 : Relation entre le CWSI_{cycle} et le TSAT_{cycle}	31
Figure 14 : Relation entre le CWSI_{phase} floraisonformation des graines et le rendement en graines	31
Figure 15a : Poids 100 graines	34
Figure 15b : Rendement en paille et graines	34
Figure 16 : effkience de l'utilisation en eau en fonction du régime hydrique	34
Figure 17a : Effets du déficit hydrique en phase végétative	37
Figure 17b : Plantes maintenues à ETM	37

B°) TABLEAUX

Tableau 1 : ETP, ETR_{max} , Kc en fonction du nombre de jours après semis	21
Tableau 2 : Bilan hydrique et rendement	22

Résumé

Dans les pays de la zone sahélienne, la sécheresse constitue une forte contrainte pour les productions agricoles entraînant une baisse de rendement. Au cours de l'hivernage 1997, une expérimentation a été conduite sur une variété de maïs, la **SYNTHETIC-C** cultivée au **champ** sous différents régimes hydriques. L'objectif principal de cette étude était d'estimer les besoins en eau et de caractériser les stades phénologiques de la **SYNTHETIC-C** durant lesquels le déficit hydrique est plus dommageable à la production. L'étude du bilan hydrique qui a été effectuée a permis d'estimer les besoins en eau de cette culture à **624,5 mm** en conditions optimales. Elle a également montré que le rendement du maïs est fortement lié à l'état hydrique du sol au moment de la floraison. Sur le plan agronomique, ce travail a **révélé** une baisse énorme du rendement et de l'efficacité d'utilisation de l'eau pendant le **stade** reproductif. Le suivi de la température du couvert et de l'indice de stress hydrique a montré que ces **paramètres** sont très sensibles à l'état hydrique du sol.

L'ensemble des résultats a permis de montrer que la floraison constitue la phase critique du cycle de développement du maïs.

En zone sahélienne, du fait de la forte probabilité d'occurrence du déficit hydrique au cours du cycle en culture pluviale, ces résultats devraient permettre à la recherche de mieux **caler** les dates optimales de semis.

MOTS CLES : Zea mays L. régime hydrique, consommation en eau, efficacité de l'eau, réponses **agrophénologiques**.

INTRODUCTION GENERALE

Originaire de l'Amérique Centrale, le maïs à l'instar du sorgho, du riz et du mil, est l'une des céréales de base les plus cultivées en Afrique. Outre son importance capitale dans l'alimentation des hommes et des animaux, ses sous produits peuvent être utilisés dans différentes industries comme la fabrication de la pâte à papier, etc. Cependant, sa culture est souvent difficile à réaliser dans le contexte de sécheresse qui sévit en Afrique depuis les années 1970 et qui a entraîné une réduction des surfaces emblavées. Au cours du cycle **cultural**, les déficits hydriques surviennent souvent pendant les phases de haute sensibilité au manque d'eau, affectant ainsi le potentiel de **développement** et par conséquent, une baisse de rendement. D'après Claassen *et al.* (1970), cette période de haute sensibilité au manque d'eau pour le maïs se situerait approximativement à une semaine avant et deux semaines après la floraison. Certaines cultures comme l'arachide développent un certain nombre de mécanismes d'adaptation en situation d'alimentation hydrique défavorable (Annerose 1990 ; Marone 1994). Pour d'autres, comme le maïs, certaines variétés s'avèreraient peu résistantes à la sécheresse (Robelin 1960 ; Morizet *et al.* 1983). Pour cette espèce, l'efficacité de l'eau consommée décroît très rapidement en condition de sécheresse. D'après Robelin (1983), ceci est dû à la faible conductivité racinaire du maïs. Ainsi, la moindre diminution du potentiel hydrique dans le sol accentue un déséquilibre de fonctionnement, et affecte donc le rendement.

Au Togo, Kwami (1991) a montré que la condition première de l'élaboration d'un bon rendement du maïs est la satisfaction de ses besoins en eau durant la phase critique (floraison et formation des graines).

Les travaux de Forest et Reyniers (1986) expliquent aussi que le rendement du maïs est lié aux indices de satisfaction des besoins en eau (ETR/ETM) au cours du cycle et particulièrement pendant la phase critique. Ces indices traduisent selon Poss *et al.*, (1988) les potentialités de la maïsiculture et les risques climatiques encourus. Cortier *et al.* (1988) à l'aide d'un modèle de simulation de bilan hydrique (BIPSEN) ont mis en évidence les effets des techniques culturales et des facteurs hydriques sur le rendement du maïs au Sénégal.

L'ensemble de ces travaux a montré donc que, le maïs est très sensible au déficit hydrique et sa culture nécessite une zone bien arrosée où les conditions hydriques ne sont pas limitantes.

Or, face à l'environnement climatique tropical de plus en plus hostile (déficit hydrique prononcé) pour les cultures, la recherche des solutions permettant d'amoinrir les effets de la sécheresse sur le maïs demeure préoccupante.

Au Sénégal, la politique agricole est orientée vers l'aménagement des bassins hydro-agricoles en vue de la **diversification** des cultures (riz, mil, arachide, maïs, etc.). Ceci permettra de diversifier les sources de production pour une **autosuffisance** alimentaire des populations rurales. Parallèlement, des recherches agronomiques sont focalisées sur la sélection des variétés à cycle court esquivant ou tolérant la sécheresse, ou encore sur d'autres stratégies, comme la quantification réelle des besoins en eau des cultures en vue de mieux caler leur cycle.

C'est dans ce cadre que le Centre d'Etude pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) s'emploie depuis plusieurs années à caractériser les mécanismes **agro-physiologiques** pouvant permettre la sélection d'un matériel **végétal** adapté aux conditions des zones sèches. Cette démarche nécessite la connaissance de l'environnement dans lequel la plante évolue. De plus, la connaissance du comportement de la plante dans son environnement, pourra permettre la détermination des stades critiques de sensibilité à la sécheresse et aussi la gestion optimale des ressources en eau qui se révèlent de plus en plus rares. Le maïs est une plante à "*problème hydrique*" présentant une sensibilité très variable dans le temps voire dans l'espace.

L'objectif de cet essai est d'une part, d'étudier les réponses aux stress hydriques des différentes phases phénologiques du maïs, la SYNTHETIC-C en différentes conditions d'alimentation hydrique, et d'autre part, d'évaluer l'impact du déficit hydrique sur le rendement et ses principales composantes.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Le système expérimental

Le matériel végétal étudié est la variété de maïs la **SYNTHETIC-C**. Cette variété à base génétique large fut sélectionnée en 1982 par l'Institut Sénégalais de la Recherche Agronomique au Centre National de Recherches Agricoles (**ISRA/CNRA**) de Bambey. Elle est caractérisée par des graines semi-dentées à cornées, ayant une forme arrondie et une coloration jaune. Elle présente une résistance à la verse et un potentiel de rendement de l'ordre de 4 tonnes à l'hectare. La **SYNTHETIC-C** accomplit son cycle en 90 jours. Son aire de culture (figure 1) selon ses sélectionneurs s'étend du département de Niour du Rip (limite nord de la culture du maïs) jusqu'au Sud du Sénégal (moyenne et haute Casamance).

1.1.1. Localisation et caractéristiques du site

L'expérimentation a été conduite à la station agronomique de Bambey CNRA (actuel CNBA) située entre la longitude 16°28' Ouest et la latitude 14° 42' Nord. Ce centre, créé en 1922 dispose d'une longue tradition en matière de recherches et d'expérimentation agricole au Sénégal et en Afrique de l'Ouest.

Le climat de la localité est caractéristique de la zone sahélienne avec deux saisons bien contrastées. Une saison des pluies de juin à octobre à distribution **unimodale** dont le maximum se situe entre août ou septembre suivant les années, et une saison sèche de novembre à juin, marquée par des températures extrêmes de l'ordre de 19° à 40°C.

La pluviosité saisonnière dépend du mouvement septentrional du Front intertropical (FIT). L'analyse fréquentielle de la pluviométrie annuelle sur la période 1966-1995 montre que pour le site de Bambey, on recueille en année médiane 460,2 mm/an.

Le sol est de type dior-modal caractéristique des sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés. Le pourcentage d'argile varie de 9,3 à 7% suivant les différents horizons et leur pH est compris entre 6 et 6,5 (**ISRA/DR**, 1995). Le volume d'eau à 100 cm de profondeur au point de flétrissement permanent (Pf 4,2) et à la capacité au champ (Pf 3) est respectivement de 14 m³ et de 134,5 m³ d'eau pour 100 m³ de sol soit une réserve utile maximale (RU max) de 120,50 mm.

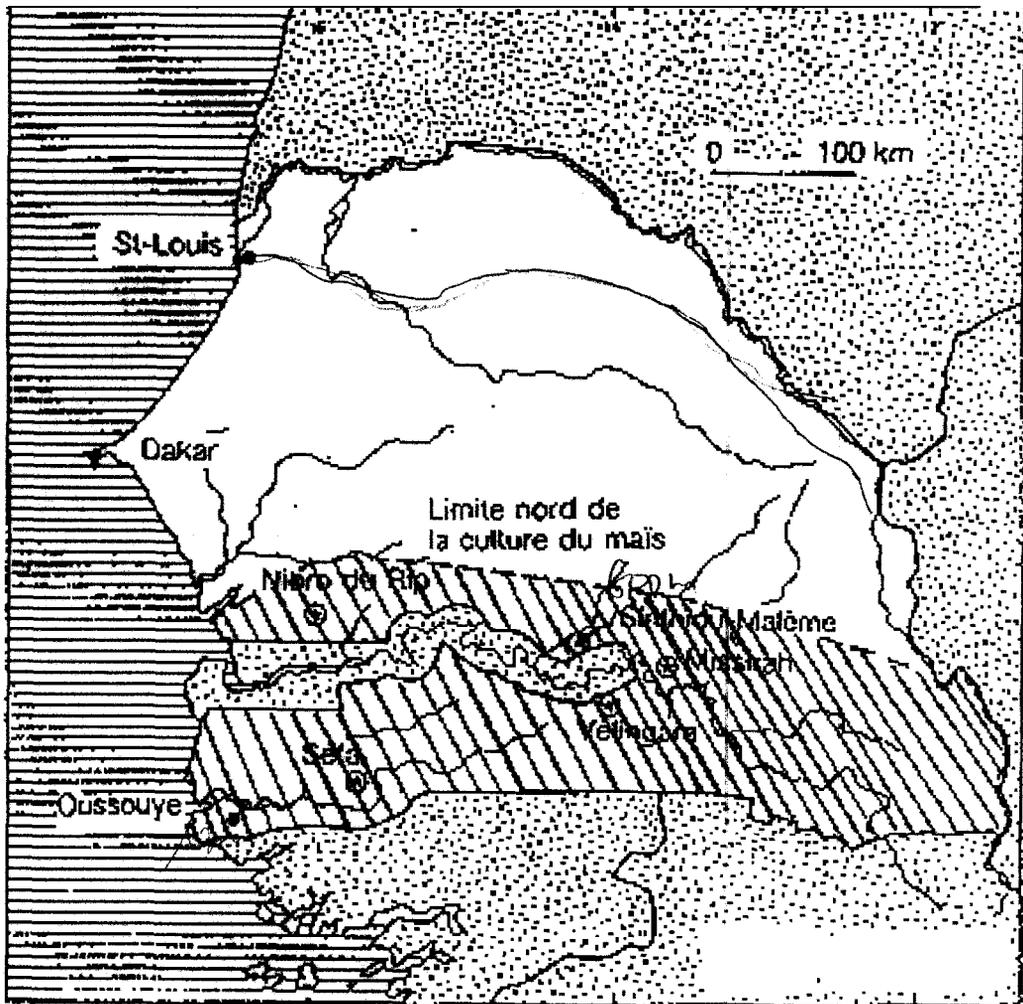


Figure 1: Région maïsicole du Sénégal, d'après Cortier et al (1988)

1.1.2. Les techniques culturales

Le labour à sec d'une profondeur de 20 à 30 cm a été effectué le 30 mai suivi d'un hersage le 2 juin. Une irrigation de 20 mm a précédé le semis. Le semis à raison de trois graines par poquet suivant un écartement de 0,80 x 0,20 m a été effectuée le 8 juillet sur un précédent **cultural** cotonnier. Les semences ont été préalablement traitées au granox. Le démariage à un plant par poquet a eu lieu lors du premier sarcla-binage effectué 13 jours après semis (**jas**).

1.1.3 Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est en blocs complets randomisés avec trois répétitions. Chaque bloc comporte quatre parcelles élémentaires de 6 m de coté. Les parcelles élémentaires sont chacune butées au niveau des bordures pour éviter tout ruissellement. Au milieu de chaque parcelle élémentaire un tube d'accès neutronique de 4 mètres de long est installé pour assurer le suivi hebdomadaire de la teneur en eau du sol. Deux lignes centrales sont réservées au carré de rendement.

Un régime hydrique comprenant les quatre niveaux suivants a été appliqué.

- alimentation hydrique satisfaisante pour maintenir les plantes à évapotranspiration maximale (ETM) durant tout le cycle (T0);
- une irrigation de complément à ETM et déficit hydrique en phase végétative (T1);
- un déficit hydrique en phase végétative et en phase floraison (T2);
- un déficit hydrique en phase floraison (T3).

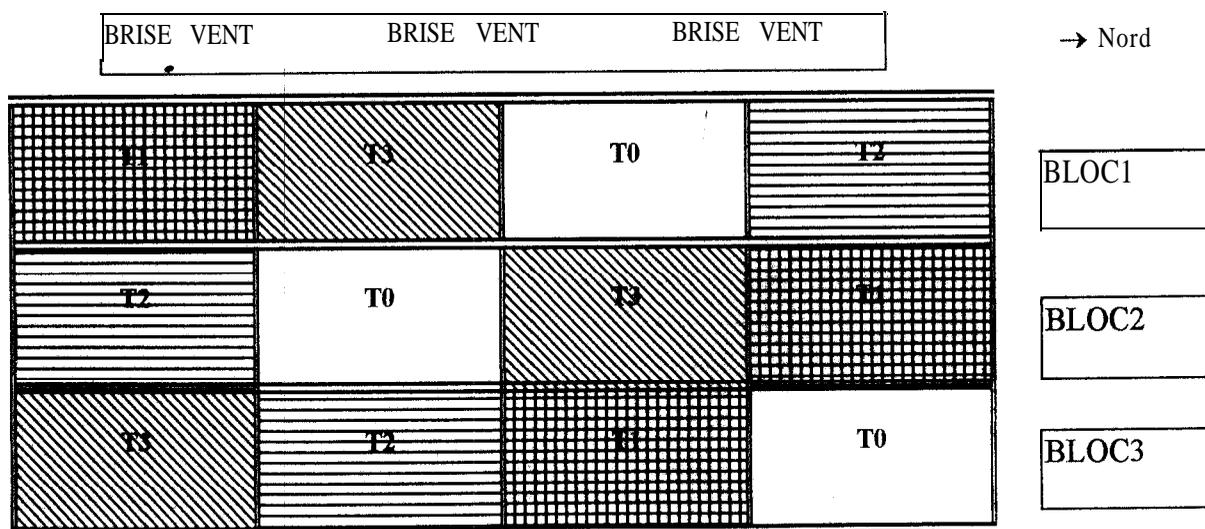


Figure 2 : Plan du dispositif de l'essai.

Pour l'application du stress, les parcelles sont recouvertes d'une bâche en plastique transparente et étanche à l'eau, pendant les périodes de pluies dans la journée, et pendant la nuit.

L'irrigation de complément est assurée par aspersion au moyen des rampes oscillantes d'une portée de 6 mètres. Des pluviomètres sont installés dans chaque parcelle pour recueillir la quantité d'eau apportée afin d'intégrer les données dans le calcul du bilan hydrique et le pilotage de l'irrigation.

1.2. Les techniques de mesure des paramètres étudiés

1.2.1. *Suivi de l'état hydrique du sol*

Deux méthodes ont permis le suivi de l'état hydrique du sol : la méthode gravimétrique et la méthode neutronique.

1.2.1.1. *La méthode gravimétrique*

Cette méthode consiste à prélever, avec une tarière sur chaque parcelle en périodes sèche et humide, des échantillons de sol, tous les 10 cm, selon le niveau d'hétérogénéité, jusqu'à 400 cm de profondeur. Les échantillons sont conservés par série de prélèvement dans des boîtes hermétiquement fermées. De retour au laboratoire, on procède à la pesée pour déterminer le poids frais puis, le poids sec après passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. On calcule ainsi l'humidité pondérale par la formule suivante :

$$H_p = (PF - PS / PS) \times 100$$

Où H_p = Humidité pondérale ; PF = Poids Frais, PS = Poids sec.

A partir de la densité apparente (d_a) et de l'humidité pondérale du sol, on détermine l'humidité volumique (H_v) en appliquant la formule suivante :

$$H_v = H_p \cdot d_a.$$

L'humidité volumique est exprimée en cm^3 d'eau par cm^3 de sol.

1.2.1.2 *La méthode neutronique*

La méthode neutronique utilise une sonde à neutrons (modèle *TROXLER* 4300) équipée d'un câble d'une source radioactive constituée d'américium et de béryllium (Am-Be) et d'un écran de lecture. Cette source émet des neutrons qui sont ralentis par les atomes d'hydrogène de

l'eau contenus dans le sol. Le nombre de neutrons ralentis qui est proportionnel à la teneur en eau du sol, est transmis au détecteur puis **affiché** au niveau de l'écran! Les données collectées sont traitées avec le logiciel Bipode Nema (IER-CIRAD-CA, version 4.04) pour la détermination de l'humidité volumique en % et le stock d'eau dans les différentes couches de sol. L'utilisation de la méthode neutronique nécessite au préalable un étalonnage de la sonde à neutrons en vue de convertir les comptages neutroniques en humidité volumique par la relation suivante :

$$Hv(\%) = a \times Nr + b$$

a et **b** étant des constantes d'étalonnage caractéristiques du type de sol.

Nr = comptage réduit $(N/Ne) \times 1000$. Ne = comptage étui

Pour cette étude, la droite d'étalonnage obtenue pour la tranche de sol 20 – 400 cm est la suivante :

- $Hv = 0,0471Nr - 2,9447$; $r^2 = 0,95$; $n = 66$

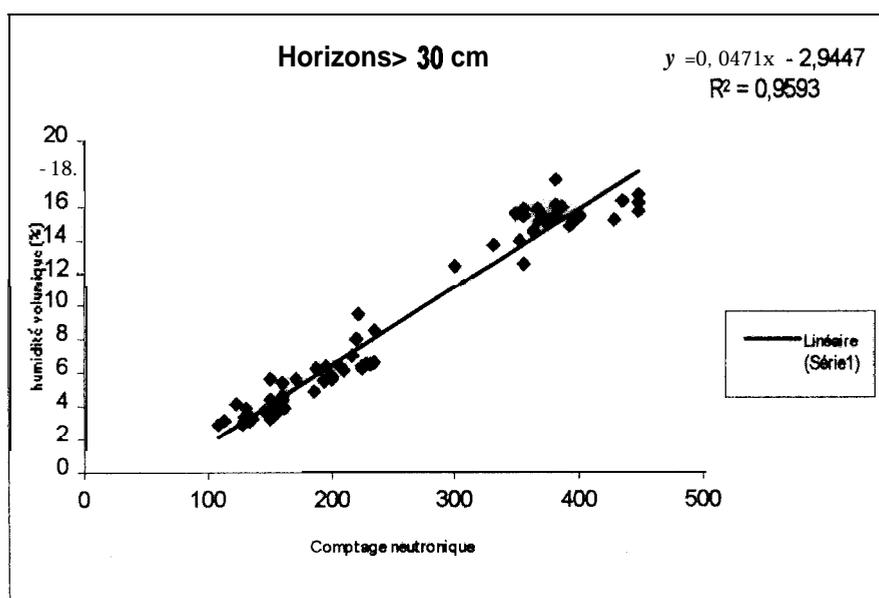


Figure 3 : Etalonnage de la sonde à neutrons (Troxler 4300) par gravimétrie

D'autre part, l'humidité du sol a été déterminée par gravimétrie pour les horizons superficiels (0-20cm). Le coefficient de détermination très significatif montre une bonne correspondance entre l'humidité volumique du sol et les comptages neutroniques, (Figure 3)

Par ailleurs, la **quantification** de l'eau réellement consommée par la plante (**ETR**) a été estimée par l'équation du bilan hydrique :

$$ETR \text{ (mm/j)} = P + I + \Delta S \pm R \pm Dr$$

où P = la pluviométrie enregistrée au niveau de la station météo située à 300 mètres environ de la parcelle expérimentale ; I est la quantité d'eau **apportée** par irrigation ; AS est la variation de stock d'eau mesurée à deux dates différentes tel que S_1 est le stock mesuré à la date t_1 et S_2 , le stock à la date t_2 ; R = ruissellement et Dr, le drainage. R et Dr ont été négligés dans le cas de notre dispositif (**buttage** des parcelles et tubes d'accès plus profonds que le front **d'humectation**, à 4 mètres de profondeur).

Le pilotage de l'irrigation est effectué en exploitant la relation (**ETM - ETR en mm/j**). ETM, de la synthétique-C a été calculée en utilisant les coefficients **cultureaux** et les Evbac mesurées, sur une longue série climatique. Les données de l'évaporation bac classa A sont celles mesurées à la station météorologique au cours de l'essai.

L'eau disponible dans le sol (ASW) a été calculée selon la formule proposée par **Lecoeur et al.**(1995). Cette relation prend en compte les stocks d'eau à la profondeur d'extraction racinaire (**PER**), au point de flétrissement permanent du sol (Pf 4,2) et à la capacité au **champ** (Pf 3) pour une profondeur donnée.

$$ASW \text{ (en \%)} = (\text{stock PER} - \text{stock Pf 4,2}) / (\text{stock Pf 3} - \text{stock Pf 4,2})$$

1.2.2 Suivi du développement de la culture.

1.2.2.1 Les mesures agromorphologiques

Le suivi du développement de la culture au pas de temps hebdomadaire été effectué durant la période d'application des traitements sur un échantillon de quatre pieds pris au hasard par parcelle élémentaire. Les mesures ont porté sur la hauteur des tiges, le nombre de feuilles, le nombre d'épis et le poids de matière sèche (tiges, feuilles, grains, épis). Ces mesures ont été interrompues dès l'arrêt de la croissance marquée par l'apparition de la fleur mâle.

1.2.2.2 La mesure de l'indice foliaire

La mesure de l'indice foliaire qui est le rapport de la surface des feuilles sur l'unité de surface de sol en cm^2/cm^2 a été réalisée sur le carré de rendement par un analyseur de l'indice foliaire

(le LAI-2000, **Licor**).

Le principe de fonctionnement repose sur la différence entre le rayonnement incident (quantum) mesuré au-dessus de la canopée et celui mesuré en différents points au niveau du sol sous la **canopée**. Le rayonnement solaire capté par l'appareil à travers le couvert, permet d'estimer l'indice de surface foliaire.

1.2.3 Le suivi de l'état hydrique et de l'indice de stress hydrique de la plante (CWSI)

1.2.3.1 La détermination du contenu relatif en eau (CRE) des feuilles

Le contenu relatif en eau des feuilles permet de caractériser l'état d'hydratation des cellules et de mesurer l'intensité de la double contrainte hydrique des sols (déficit hydrique) et de l'**atmosphère** (demande **évaporative**).

Pour déterminer le **CRE**, des prélèvements de disque foliaire ont été effectués sur la troisième feuille du sommet de la tige principale et automatiquement mis dans des fioles préalablement tarées. Ces mesures ont été effectuées entre 12 et 13 h (T.U.). Le poids de matière fraîche (PF) de chaque échantillon est déterminé à l'aide d'une balance de précision, **METTLER AE 100**. Les mêmes échantillons sont réhydratés dans de l'eau distillée pendant 4 heures avant de déterminer leur poids turgescent (PT). Le poids de matière sèche (PS) de la feuille est obtenu après passage des échantillons à l'étuve **85°C** pendant 24 heures. On calcule ainsi le CRE par la formule suivante :

$$CRE = [(PF - PS) / (PT - PS)] \times 100$$

1.2.3.2 Le suivi de la température du couvert végétal

La température du couvert végétal a été mesurée au moyen d'un radiothermomètre à capteurs infrarouges, (**Telatemp AG42[®]**). Son fonctionnement repose sur le principe selon lequel, tout corps émet des rayonnements dont les longueurs d'ondes dépendent de sa température. Sur cette base, l'appareil détecte suivant un angle d'incidence de 20 à 30°, les radiations émises par le couvert visé. Il mesure sa température de surface et déduit automatiquement le différentiel de température (AT) entre le couvert et l'air ambiant (**Tc-Ta**). Les mesures sont effectuées entre 12 h et 13 h, considérées comme des moments de la journée où les conditions climatiques sont supposées moins variables, et où, les plantes assurent le maximum de transpiration, si elles sont bien alimentées en eau.

Cette mesure permet de déterminer des valeurs seuils de l'indice de stress hydrique ou **Crop Water Stress Index**, (CWSI) en fonction des facteurs du milieu (humidité relative de l'air,, déficit de pression de vapeur, radiations, etc.) afin de déclencher l'irrigation. Cette méthode autorise ainsi le pilotage de l'irrigation pour une utilisation plus rationnelle de la ressource, eau.

Le concept de CWSI a été développé par **ISO** (1981). Pour le déterminer, une journée entière bien ensoleillée a été consacrée aux mesures des températures du couvert végétal et de l'air. Aussi, au même moment, un psychromètre ventilé a été utilisé pour mesurer la température humide et la température sèche de l'air afin de calculer le déficit de pression de vapeur (**DPV**). Celui-ci est calculé avec le logiciel SANJI version n° 5 Béta-test. Les données, obtenues ont permis de déterminer les limites inférieure et supérieure de la différence de température (**Tc-Ta**), et la détermination du Crop Water Stress Index (**CWSI**) de la, **SYNTHETIC-C**.

Le CWSI est le rapport de la distance verticale d'un point donné situé au-dessus de la limite inférieure sur la distance totale entre les limites inférieure et supérieure (figure 4). Le rapport indique l'état de transpiration maximale à celle de transpiration nulle de la plante pour des valeurs du CWSI comprises entre 0 (alimentation optimale) et 1 (stress hydrique extrême). Le calcul du CWSI à partir de la limite supérieure et de la limite inférieure a été automatisé par une fonction écrite en langage Visual Basic dans Excel, grâce à l'aide précieuse du biométricien. Le CWSI peut être corrélé avec les niveaux de disponibilité en eau du sol, le taux de satisfaction des besoins en eau (TSAT) et avec les paramètres de rendement final.

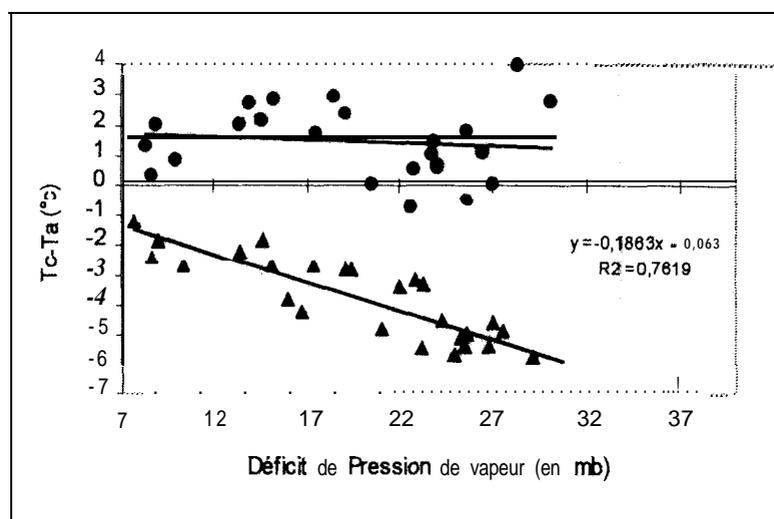


Figure 4 : Evolution du différentiel de température entre le couvert et l'air en fonction de la demande évaporative.

19 sters

62 jours
pour les phases de déficit hydrique

2 RESULTATS

2.1. Analyse des résultats

L'analyse des résultats a été effectuée avec le logiciel STAT-ITCF. L'analyse de la **variance** (ANOVA) et le test des moyennes de Newman **Keuls** au seuil 5 % ont permis de distinguer les différents traitements. Pour ce faire, on a effectué une analyse de **variance** à un facteur (régime hydrique) pour mettre en évidence les réponses agro-phénologiques et l'**efficience** d'utilisation de l'eau de la SYNTHETIC-C. La représentation graphique des données a été possible grâce à Excel97.

2.1.1 Conditions climatiques de la campagne

Au cours de l'hivernage 97, les conditions climatiques ont été suivies à l'aide d'une station météorologique automatique de type Cime1 située à 300 m de l'essai. Il faut noter que l'hivernage a été globalement caractérisé par une irrégularité des pluies et la faiblesse des hauteurs d'eau tombées. Le total pluviométrique de juillet 89,1 mm n'atteint pas le cumul médian (1966-1995) qui est de 100,6 mm soit un déficit de 12%. L'essentiel de la pluviométrie de juillet est enregistrée en une seule journée le 9, (72,5 mm). Deux périodes de sécheresse sont intervenues après l'installation de la culture. La première d'environ onze jours a été observée entre le 3^{ème} et le 12^{ème} jour après semis, confirmant ainsi les épisodes secs de l'ordre de 10 à 15 jours observés par Sivakumar (1988) durant les phases végétatives en Afrique de l'Ouest. La seconde, d'une durée de neuf jours est intervenue entre le 18^{ème} et le 26^{ème} jour après semis (figure 5a). Toutefois, il faut préciser que pendant les phases sèches, les traitements en régime ETM bénéficiaient d'une irrigation d'appoint.

Le cumul pluviométrique enregistré du 8 juillet au 1^{er} octobre (respectivement date de semis et date de récolte) donne 329,2 mm contre 437,8 mm pour la même période sur la série 1966-1995 correspondant au scénario moyen 5 années sur 10, soit un déficit de 25%.

Les valeurs moyennes de l'humidité relative ont varié respectivement entre 84,2% et 100% pour les maxima et entre 36,7% et 70,7% pour les minima (figure 5c).

La moyenne des températures était comprise entre 30,7°C et 38,9°C pour les maxima ; 21°C et 25,8°C pour les minima.

L'évaporation journalière en bac classe A normalisé a varié entre 14,6 et 1,2 mm. La

moyenne journalière durant la période de culture est de 7,4 mm (figure 5b).

La vitesse moyenne des vents était de 2,8 m/s, et la durée d'insolation journalière comprise entre 0 et 11 heures a une moyenne de 6,8 heures.

Le rayonnement global (R_g) a été estimé à partir de la formule de Black. Son équation est la suivante :

*Il est donné par le
tableau automatique ci-dessous*

$$R_g = I_{ga} ((a + b(h/H))), \text{ en joules/cm}^2/\text{j. où}$$

I_{ga} est égal au rayonnement global au-dessus de l'atmosphère

H est égale à la durée astronomique du jour et h , la durée d'insolation.

a et **b** sont des constantes variant suivant la latitude du lieu. Pour la latitude de **Bambey**, **a** est de 0,25 et **b** est de 0,40.

Ainsi, le rayonnement global journalier sur la période de l'essai était compris entre 2683 et 1124 joules/cm^2 avec une moyenne de 2141 $\text{joules/cm}^2/\text{j}$ (figure 5d).

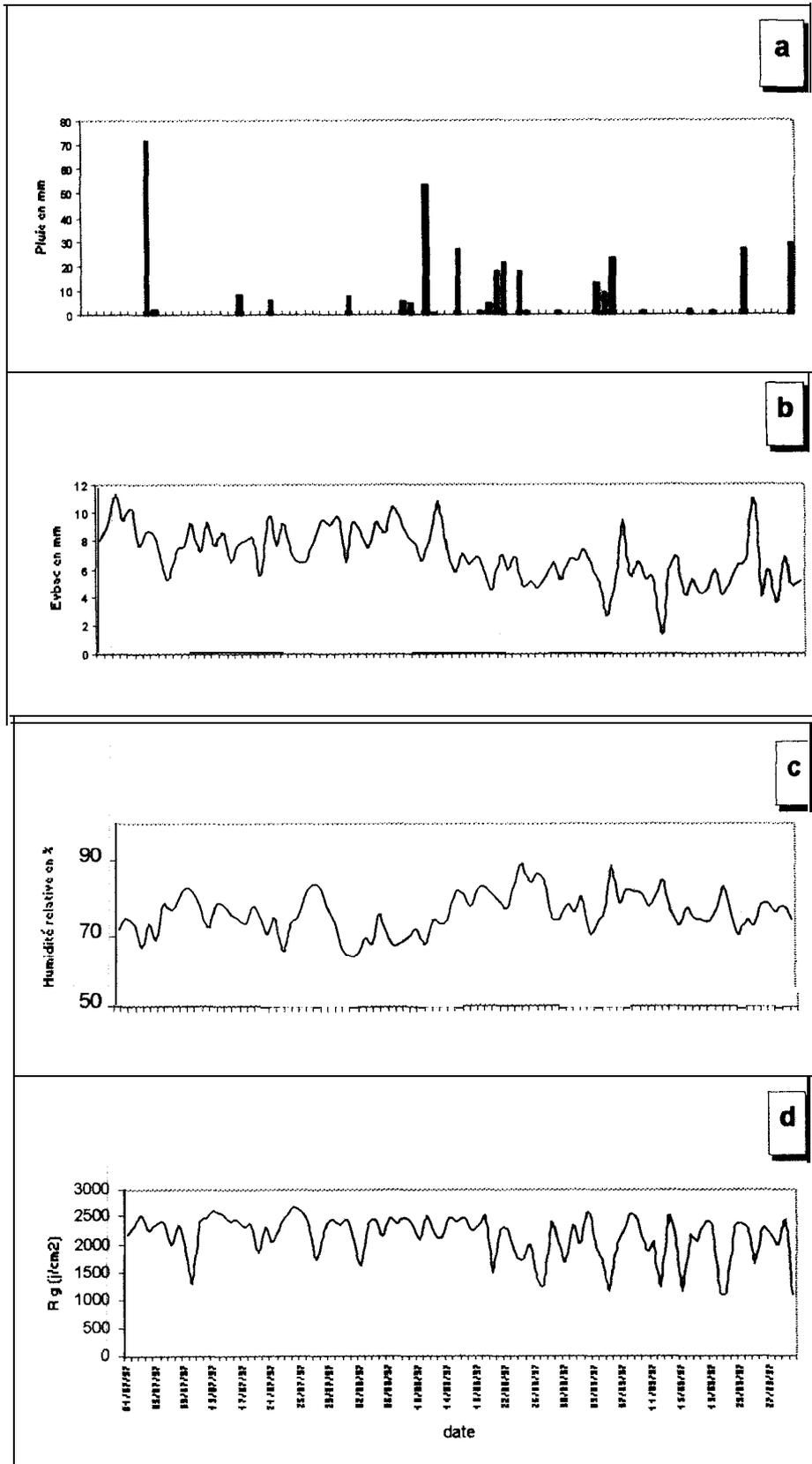


Figure 5 : Conditions climatiques de l'hivernage 1997 à Bambeï-CNBA

- a) pluviométrie en mm ; b) Evaporation bac classe A en mm ;
c) Humidité relative (%) ; d) Rayonnement global en J/cm^2 .

2.1.2. Dynamique de l'eau dans le sol, alimentation hydrique et développement de la culture

2.1.2.1. L'eau dans le sol et la profondeur d'extraction racinaire (PER)

Les mesures de la teneur en eau ont permis de suivre la dynamique de l'eau dans le sol et la profondeur d'extraction racinaire au niveau des différents traitements (figure 6). La dynamique de l'eau a été influencée par les variations du niveau de stock dues à l'application différentielle du régime hydrique. Ces profils montrent que d'une part, la teneur en eau dans les parcelles témoins (TO) est restée élevée et a varié entre 8 et 25% et que d'autre part, la profondeur d'extraction racinaire (**PER**) était de 60 cm (figure 6a). Ceci a été confirmé par le carottage effectué au 69^{ème} jas. On peut ainsi constater que les racines présentent une croissance journalière de 0,86 cm. Sur les parcelles stressées (T1, stress phase végétative) et (T3, stress phase floraison), la PER atteint pour la même date une profondeur de 85 cm soit une croissance de 1,23 cm/j (figure 6 b et d). Pour le traitement T2 stressé en phase végétative et en phase floraison, la PER atteint 100 cm au 69 jas, soit une vitesse de 1,44 cm/j (figure 6c). On remarque qu'en face d'un déficit hydrique, le maïs développe un système racinaire profond pour mieux explorer l'eau du sol.

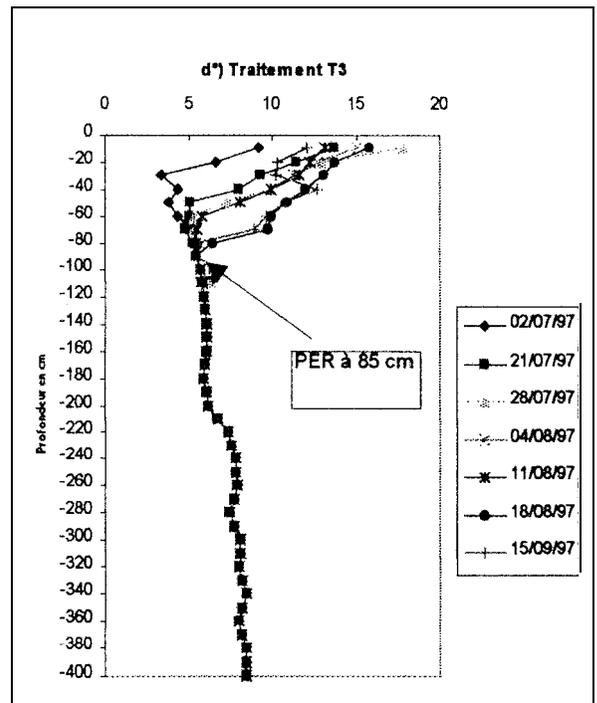
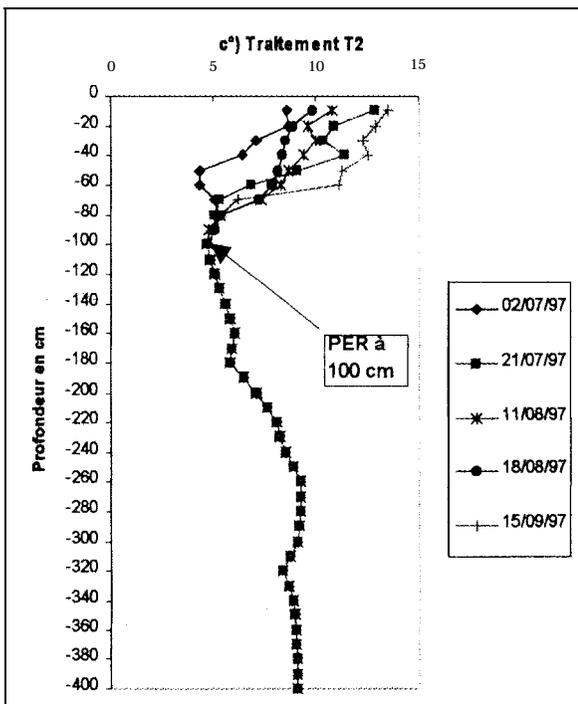
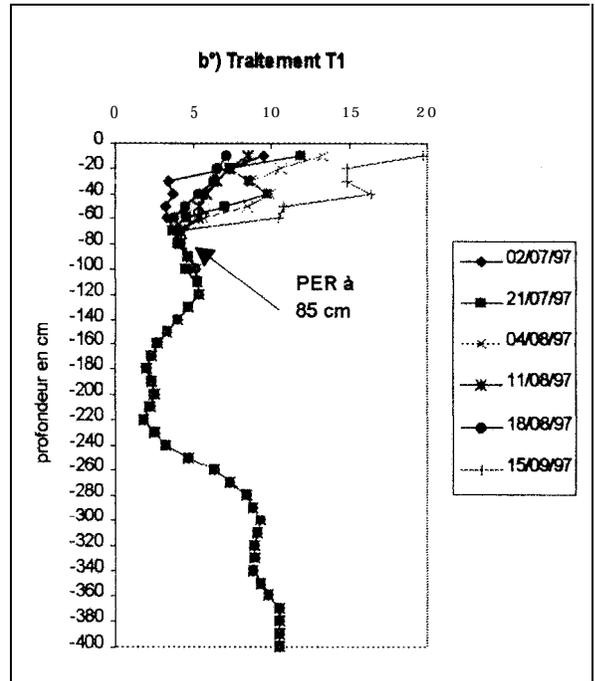
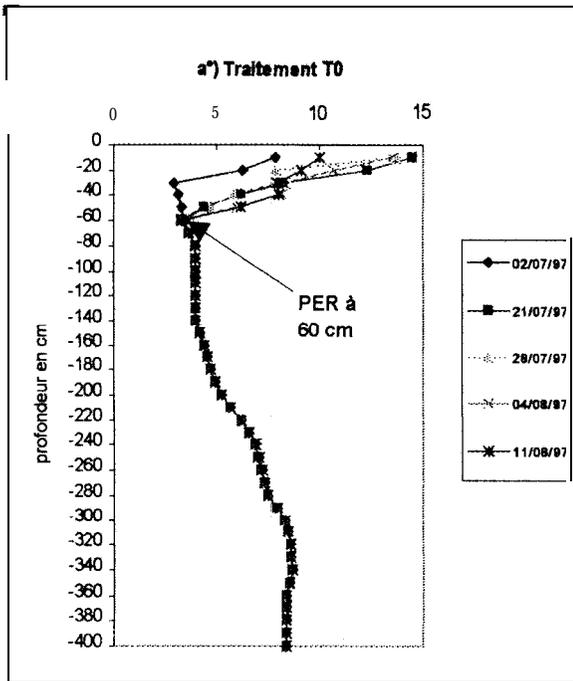


Figure 6 a, b, c, d. : Profils hydriques des différents traitements

2.1.2.2. Consommation en eau des plantes et niveau de satisfaction des besoins en eau

L'Evapotranspiration réelle (ETR) correspond à la quantité d'eau consommée par la culture. On peut remarquer que sur l'ensemble des traitements, la consommation journalière est presque la même à 27 jas. En revanche, l'application du stress a entraîné une diminution de l'ETR (figure 7a) des traitements T1 (1,8 mm/j) et T2 (0,8 mm/j) à 41 jas alors qu'elle reste très proche de 10 mm/j pour les TO et T3. Au 62^{ème} jas, l'ETR journalière de T3 et T2 alors stressés atteint la valeur de 1,9 mm/j, pendant que TO et T1 ont une ETR très voisine de 7 mm/j, (figure 7a).

La moyenne des coefficients culturaux obtenus (dernière ligne du tableau 1) peut être considérée comme les coefficients actualisés de la SYNTHETIC-C. L'ETM correspond à la transpiration maximale de la plante et traduit les besoins maximaux en eau de la plante.

Tableau n° 1 : ETP, ETRmax et KC en fonction du nombre de jour après semis

JAS	6	13	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83
Evbac	7,4	8	7,4	8,6	8,8	8,1	6	5,8	5,9	5	5,1	6,2
ETRmax	2	3,9	5	8,1	10,6	12,0	11,3	9,7	8,1	6,6	5,6	5,5
Kc1997	0,27	0,48	0,67	0,94	1,20	1,48	1,71	<u>1,53</u>	<u>1,36</u>	1,31	1,09	0,88
KcVand*	0,29	0,48	0,50	0,80	1,09	1,6	1,77	1,8	1,5	1,3	0,8	0,5
MoyKC	0,28	0,48	0,59	0,87	1,14	1,54	1,74	1,8	1,5	1,30	0,95	0,69

* Coefficient culturaux obtenus par Yanakrchnitt en 1989 sur la Synthétic-c. On n'a pas tenu compte des valeurs soulignées dans le calcul des KC moyens.

Cette diminution de l'ETR, induite par le déficit hydrique du sol, explique bien le faible niveau du taux de satisfaction des besoins en eau (TSAT) chez les stressés. Ce taux (ETR/ETM), met en rapport ce que la plante a réellement consommé sur ce qu'elle aurait consommé dans les conditions optimales. Le TSAT est non seulement un indicateur du confort hydrique de la plante mais explique aussi les niveaux de rendement obtenus.

La figure 7b montre l'évolution du TSAT au cours du cycle. On peut constater que la contrainte hydrique provoque toujours une chute brutale du TSAT. Ainsi, celui-ci a atteint des valeurs seuils très faibles au 41^{ème} jas (T1 : 12,41% ; T2 : 5,79%) et au 62^{ème} jas (T2 :

25,98% ; T3 : 21,76%) correspondant respectivement aux stress en phase végétative et reproductive D'après Chopart et Koné (1991) ces valeurs (< 30%) traduisent des niveaux de stress très sévère chez le maïs.

L'irrigation de complément des témoins (TO) sur l'ensemble du cycle a accéléré la consommation en eau et a permis d'obtenir des niveaux d'alimentation en eau optimale (TSAT de l'ordre de 90%). Durant l'application du deuxième stress sur les T2 et T3 en phase floraison, le TSAT moyen est de 34,06 % pour T1 et de 46,11 % pour le T3. Ce qui correspond également à un déficit hydrique très sévère.

Le tableau 2 ci-dessous, montre qu'au cours du cycle, les traitements ont reçu des volumes d'eau différents. le traitement TO par exemple, a reçu en moyenne 773,8 mm d'eau (irrigation + pluie).

Suivant les traitements, on note une variation importante de l'ETR. Le traitement TO et T3 ont consommé plus d'eau au cours du cycle avec respectivement 624,98 mm et 552,99 mm. Ce qui correspond approximativement aux besoins en eau théorique exprimés dans le Mémento de l'Agronome (1991). Par ailleurs, T1 et T2 ont utilisé moins d'eau avec respectivement 464,96 et 429,92 mm du fait de l'intensité (T2) et de la phase d'application (T1) du stress.

Tableau N°2 : Bilan hydrique et rendement

Traitement	Irrigation (mm)	Pluie (mm)	ETR (mm)	ETR/ETM (%)	Rendement moyen t/ha
TO	444,5	329,3	624,98 a	91,25	4,05 a
T1	389,41	239,4	464,96 c	72,72	2,44 b
T2	291,33	191,5	429,92 c	67,49	1,28 b
T3	342,62	281,4	552,99 b	79,18	1,65 b

NB : Les valeurs affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil 5%, d'après le test de Newman Keuls.

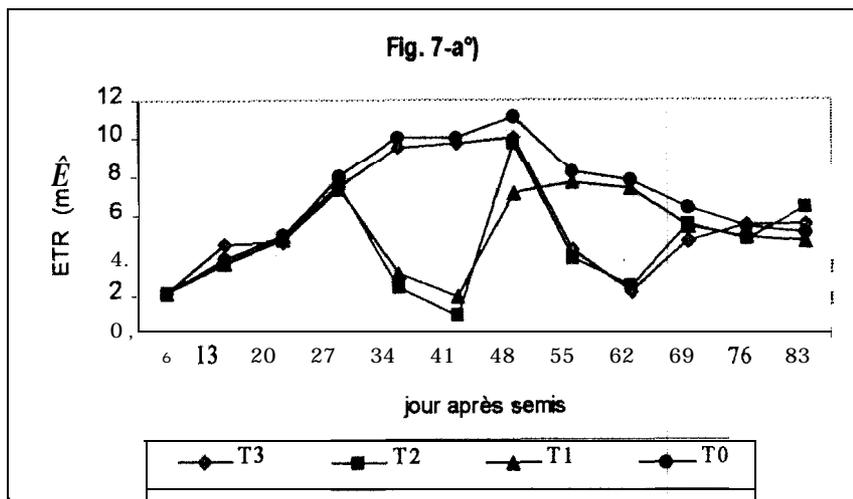


Figure 7-a°) : Evolution de l'Evapotranspiration réelle (ETR) journalière

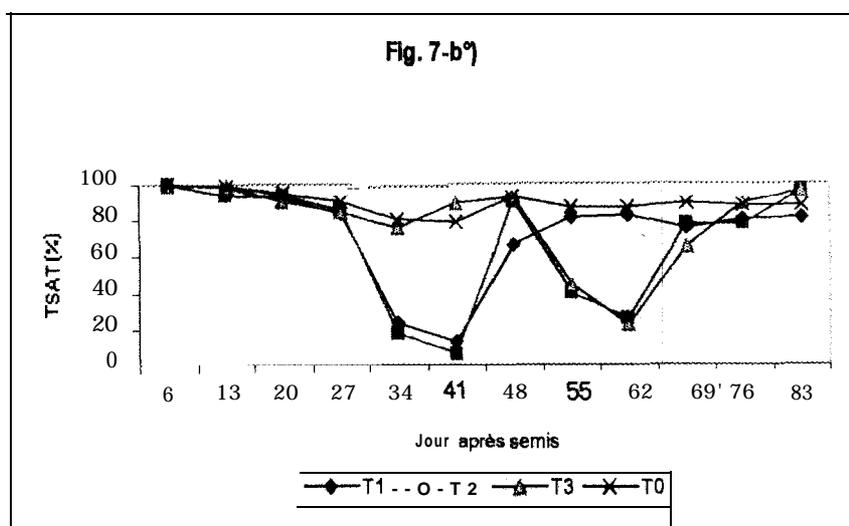


Figure 7-b°) : Evolution du Taux de satisfaction des besoins en eau

2.1.3 Effets du stress sur les paramètres de rendement et de développement de la plante

2.1.3.1 Sur la croissance en hauteur des tiges

La figure 8a donne la croissance en hauteur pour les différents traitements. L'analyse de la variance révèle qu'il n'y a pas de différence significative entre les différents traitements durant les 37 premiers jas. Le stress n'a pas eu d'impact sur la croissance comparée des individus des traitements.

On remarque que l'effet du stress sur la croissance en hauteur des tiges s'exprime à partir de 41 jas. Les individus du traitement TO ayant reçu un apport d'eau régulier durant tout le cycle montrent une croissance plus forte (89,50 cm) alors que ceux des traitements T1 et T2 ont une croissance ralentie (hauteur 25,97 cm). Les individus du traitement T3 quant à eux ont présenté une croissance moyenne intermédiaire entre les précédents.

D'autre part, la vitesse de croissance (figure 8b) indique une évolution quasi similaire à celle de la croissance en hauteur sauf qu'elle a permis de distinguer les traitements dès le 34^{ème} jas. Au 41^{ème} jas, elle est respectivement de 5,5 cm/j pour TO, de 3,5 cm/j pour T3 puis de 0,22 à 0,30 cm/j pour T2 et T1. Cette vitesse de croissance atteint son optimum au 44^{ème} jas avec 5,9 cm/j pour TO et une moyenne de 4,5 cm/j pour les autres traitements. Au 44^{ème} jas, on note une différence assez significative de l'effet du stress entre les traitements. Toutefois, il faut remarquer qu'à partir de cette date, la croissance ne permet plus de différencier les traitements pour le reste de la phase de récupération (qui a suivi le stress) et la seconde phase de déficit hydrique. Parallèlement, la vitesse de croissance diminue pour s'annuler au 55^{ème} jas.

Quant au nombre de feuilles, l'analyse statistique n'a montré aucune différence significative entre les traitements.

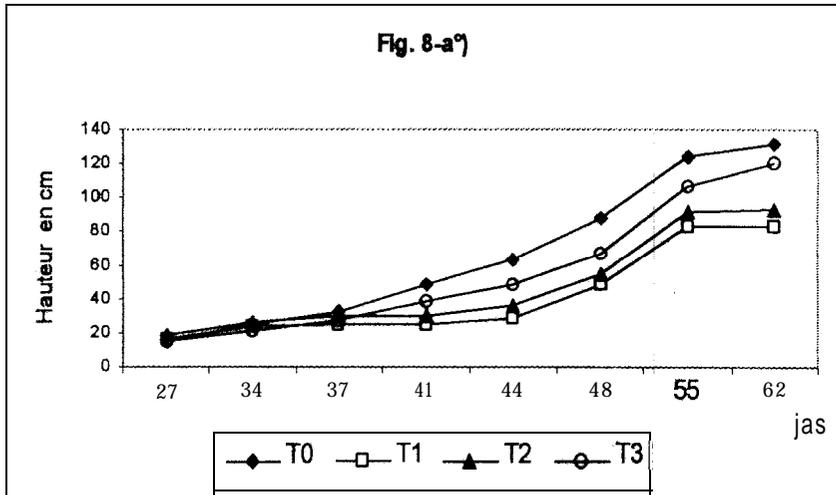


Figure 8 a°) : Croissance en hauteur des tiges

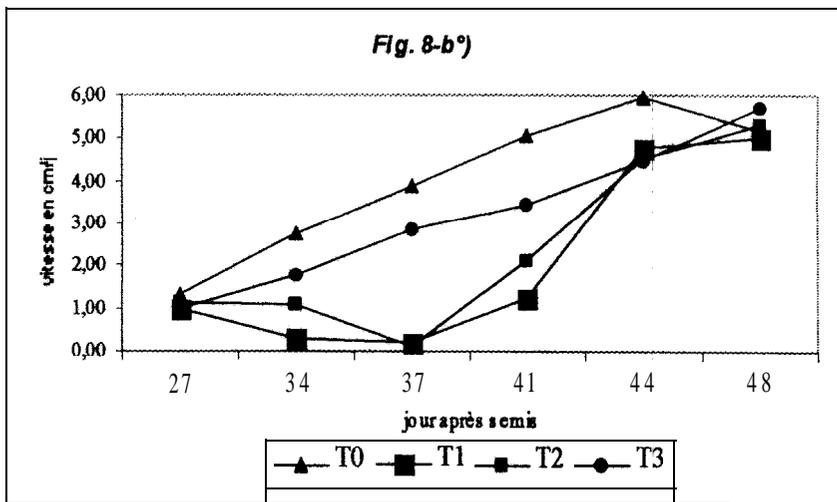


Figure 8 b°) : Vitesse de croissance en hauteur des tiges

2.1.3.2 Sur le développement du couvert végétal

L'indice de surface foliaire, caractérise la quantité du feuillage et la structure du couvert végétal qui jouent un rôle important dans l'interception du rayonnement solaire incident et dans la régulation de la température de l'air, et des échanges gazeux au niveau de la plante. On constate qu'au niveau des traitements, l'indice foliaire augmente au cours du cycle de développement jusqu'à la floraison, (figure 9). A ce moment, l'indice atteint des valeurs maximales de l'ordre de 2,80 pour les traitements en régime ETM et autour de 1 pour les traitements antérieurement stressés. La période post-florale est marquée par une baisse de l'indice jusqu'à la fin du cycle.

2.1.4. Effets de la sécheresse sur l'état hydrique de la plante

2.1.4.1. Sur le contenu relatif en eau (CRE)

Les résultats du CRE obtenus montrent une réponse perceptible de l'état hydrique des feuilles. Celles-ci (feuilles) jouent un rôle déterminant dans le développement du couvert, la captation de l'énergie solaire, la photosynthèse globale et finalement la production (Robelin, 1983).

L'analyse de la **variance** montre que, de la levée jusqu'au 27^{ème} jas, il n'y a aucune différence significative entre les traitements (figure 10). Les plantes étaient en pleine turgescence. La moyenne du CRE varie entre 82 à 95,5 %. A partir du 27^{ème} jas jusqu'au 41^{ème} jas. On note une différence inter-traitement significative. Un 1^{er} groupe formé des traitements TO et T3 ayant respectivement un CRE de 90,3% et 89%. Le second, regroupe les traitements **stressés** avec un CRE variant entre 74 et 75 %. Jusqu'à la levée du stress, 41 jas, les deux groupes se distinguent par une variation importante du CRE de 66% (T1) et de 67,7 (T2) c'est à dire (quinze jours de stress). En revanche, au moment de la reprise de l'irrigation (trois jours après la levée du stress), l'effet intertraitement devient non significatif. Ce qui traduit une bonne capacité de récupération de cette variété après un stress de quinze jours durant la phase végétative.

En phase floraison, l'analyse de la **variance** ne montre aucun écart significatif entre les traitements.

A la fin du deuxième stress, le CRE moyen du traitement T2 (stress phase végétative et phase floraison) est de 79% alors que celui du traitement T3 stressé une seule fois (T3) est de 72%.

Le CRE est plus sensible au stress en phase végétative qu'en phase floraison. Mais pour une meilleure appréciation de son évolution, l'analyse de la température du couvert végétal permettra d'apprécier le niveau de déshydratation des feuilles.

2.1.4.2. Sur l'indice de stress hydrique des cultures

Les résultats de l'indice de stress hydrique des cultures ou le Crop Water Stress Index, (CWSI) montrent une nette différence entre le différentiel de température du couvert des plantes **stressées** et celui des plantes non stressées. En effet, sur les parcelles TO, on note une baisse du différentiel de température avec une augmentation du 'déficit de pression de vapeur (DPV). Le CWSI varie de 0 à 0,2 pour les témoins (TO) durant tout le cycle, et de 0 à 0,07 (51 jas) chez les T3 avant l'application du stress, (figure 11). Au cours du stress phase floraison, les valeurs du CWSI pour le même traitement T3 ont varié de 0,47 à 0,69.

Pour T1(stress phase végétative) le CWSI atteint la valeur de 1 à 41 jas pour un différentiel de température de $-3,49^{\circ}\text{C}$ et un DPV moyen de 14,90 mb. Le traitement T2 (stress phase végétative et phase floraison), présente des valeurs du CWSI variant entre 0 à 1 puis de 0,1 à 0,57 correspondant respectivement à la fin du premier et du deuxième stress. Les valeurs comprises entre 0 et 1 montrent la sévérité du stress. On a recherché d'éventuels liens statistiques entre le CWSI et les autres paramètres hydriques du sol comme l'eau disponible du sol (ASW).

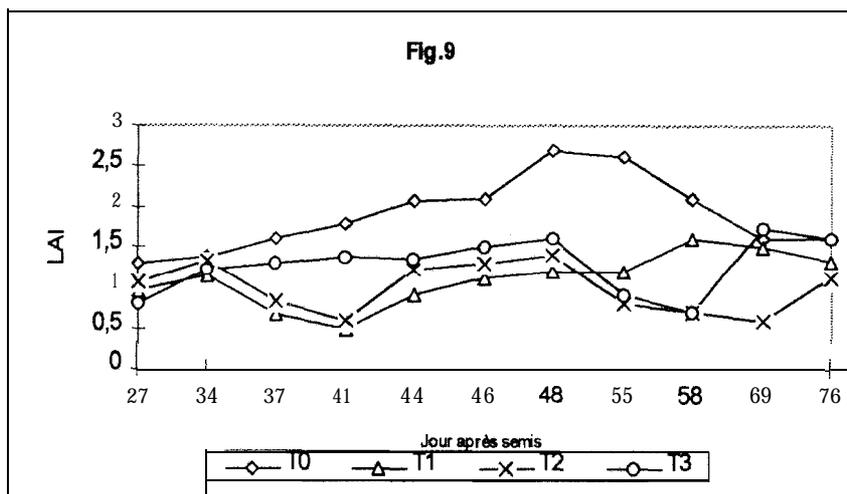


Figure 9 : Evolution de l'indice de surface foliaire par traitements

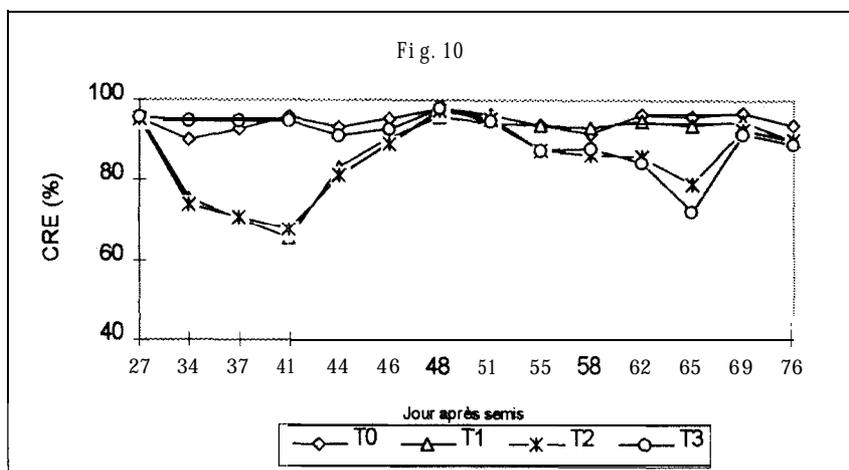


Figure 10 : Evolution du Contenu relatif en eau (CRE) par traitements

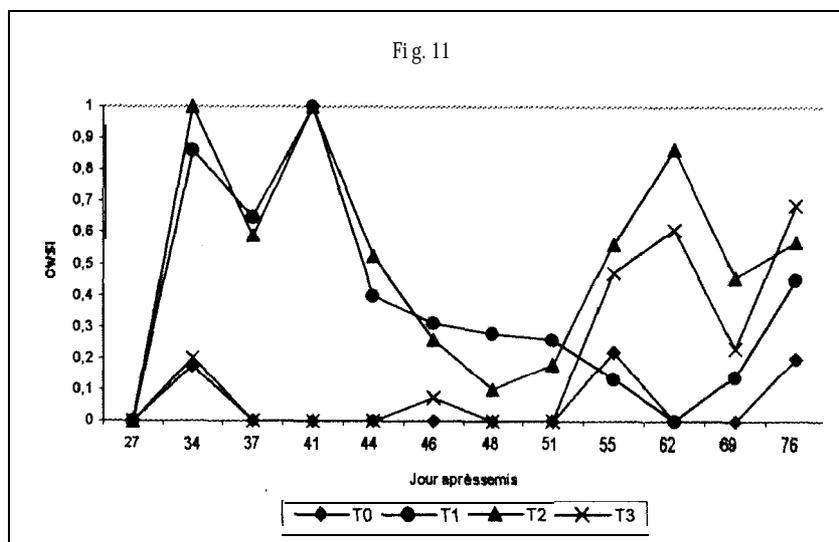


Figure 11 : Evolution de l'indice de stress des plantes (CWSI)

2.1.4.3 Evolution comparée de l'eau disponible dans le sol et de l'indice de stress hydrique (CWSI)

. L'évolution comparée (figure 12) de la fraction d'eau transpirable ou Available soil Water (ASW) et du Crop Water Stress Index (CWSI), montre l'étroite dépendance entre l'eau disponible dans le sol et la température du couvert végétal. Pour des fortes valeurs du CWSI, correspondent de faibles niveaux de disponibilité en eau dans le sol. C'est l'exemple des traitements T3 et T2 **stressés** en phase floraison où la contrainte hydrique du sol, associée à la forte demande climatique, accroît la température du couvert végétal. On note qu'une augmentation ~~rapide~~ du CWSI est étroitement associée à une baisse de l'eau disponible de l'ordre de 50 % (figure 12a, b, c.).

2.1.4.4. Relation entre le CWSIcycle et le TSATcycle

Cette relation linéaire (figure 13) significative avec un **coefficient** de détermination $R^2 = 0,85$ montre que le CWSIcycle et le TSATcycle sont deux paramètres importants caractérisant l'état hydrique des plantes. Pour le TSAT, le seuil < 80-75 % correspondant à un déficit modéré à sévère (Chopart, 1991) pourrait être retenu comme valeur seuil pour le déclenchement de l'irrigation (contre 70 -65 % pour le mil et l'arachide). La valeur du CWSI correspondante est de l'ordre de 0,27 et le niveau de l'eau disponible est de 50 %. Annerose *et al* (1996) ont mis en relation le CWSI et le potentiel hydrique foliaire sur l'arachide et ont trouvé une valeur seuil de 0,3 permettant de déclencher l'irrigation. Ces résultats sur le maïs confirment sa plus grande sensibilité au stress hydrique comparé aux autres céréales comme le mil.

2.1.4.5. Relation entre le CWSI à la phase floraison/formation des graines et le rendement en grains

Une relation entre le CWSI durant la phase floraison et formation des graines a été mise en évidence avec le rendement en grains. Cette relation non linéaire, mais significative avec un R^2 0,83, montre que le stress hydrique durant cette phase critique entraîne une chute de rendement lorsque les valeurs du CWSI se rapprochent de 1. Le CWSI phase floraison-formation des graines compris entre 0 et 0,27 donne un niveau de rendement potentiel pour la SYNTHETIC-C, (figure 14). Ces résultats confirment que le rendement final dépend étroitement des conditions hydriques de la plante durant la phase centrée autour de la floraison.

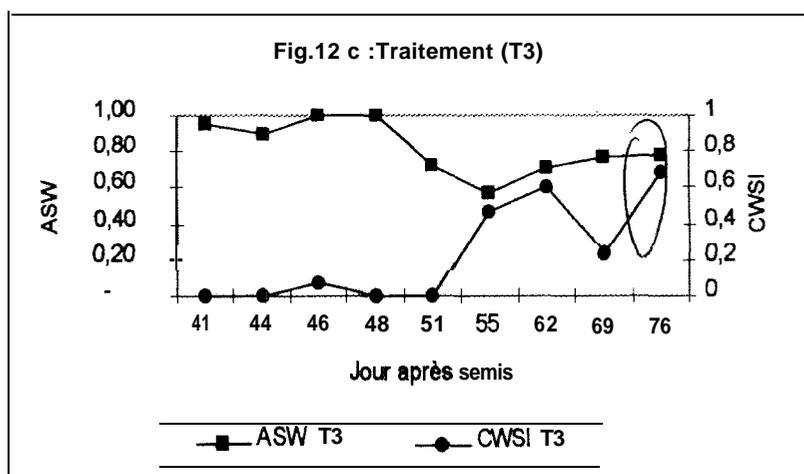
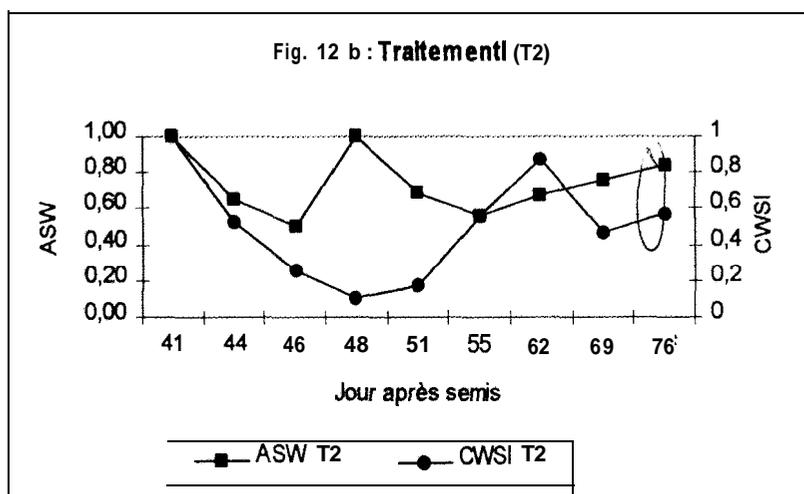
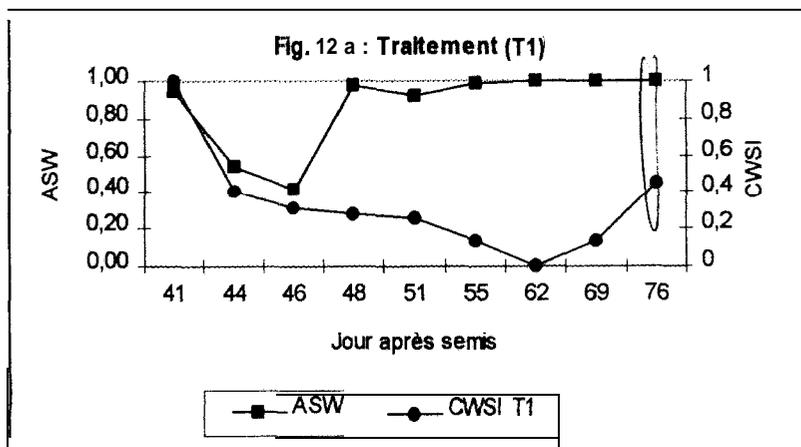


Figure 12 a,b,c : Evolution comparée de l'eau disponible dans le sol (ASW) et de l'indice de stress hydrique des plantes (CWSI)

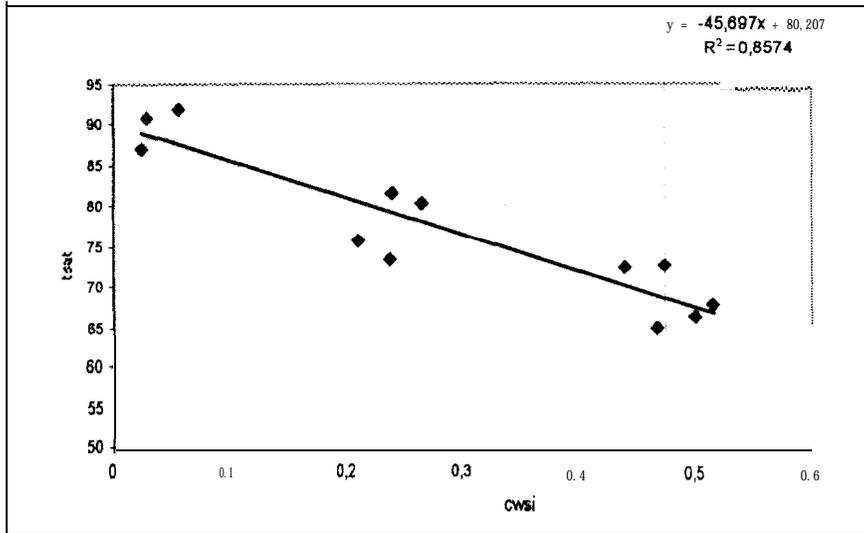


Figure 13 : Relation entre le CWSIcycle et te TSATcycle

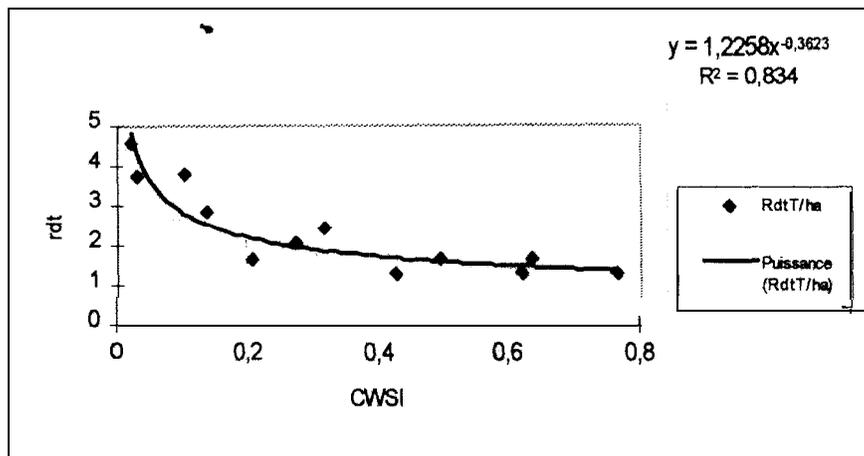


Figure 14 : Relation entre le CWSI phase floraison formation graine et le rendement grain

2.1.5. Effets de la sécheresse sur le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau

2.1.5.1. Effets de la sécheresse sur les composantes de rendement

Les principales composantes du rendement qui ont été suivies sont : le nombre total d'épis productifs, nombre total d'épis improductifs, nombre de grains par m^2 et poids de 100 grains, et la paille. S'agissant du nombre d'épis productifs et improductifs, le test n'a révélé aucune différence significative entre les différents traitements. Cependant, l'analyse a fait ressortir trois groupes homogènes pour le nombre de grains par m^2 . Le premier groupe est constitué du traitement TO avec 1240 grains/ m^2 , le deuxième est celui du traitement T1 stressé en phase végétative où on compte 764 grains/ m^2 et le troisième groupe est constitué des traitements T2 (stressé en phase végétative et en phase floraison) et T3 (stressé en phase florale) avec respectivement 325 et 316 grains/ m^2 (figure 15 a). Ce qui explique l'effet marqué du déficit hydrique en phase florale sur le rendement.

D'autre part, le poids de 100 graines, et la qualité des graines ont été influencés par l'application différentielle du régime hydrique. Pour les stressés, on a des épis avortés, un nombre important de graines mal remplies et ridés. Le poids de 100 graines par traitement a été respectivement de 32,7 g pour TO; 25,2 g (T1); 13,3 g (T2) et 17,1 g (T3).

2.1.5.2. Effet de la sécheresse sur le rendement en matière sèche

On note un effet additif réel de la sécheresse sur le rendement en paille. En effet, on distingue deux groupes pour le rendement en paille (figure 15 b). Le premier est formé de TO, T1, T3 avec respectivement 5,15 t/ha, 3,88 t/ha, et 3,04 t/ha et un second formé uniquement du double stressé (T2) avec un rendement très faible de 0,23 t/ha. Ces résultats confirment ceux de Bretaudeau et al (1991) où la contrainte hydrique est un handicap sérieux à la production de la matière sèche des céréales.

2.1.5.3. Effets du déficit hydrique en phase florale sur le rendement

L'analyse de la variance a permis de distinguer deux groupes homogènes du niveau de rendement au seuil de 5 % (test de Newman Keuls). Le premier groupe constitué du témoin (TO) avec des rendements en grains élevés de 4,05 t/ha (figure 15b). Le second est composé des stressés (T1, T2, T3) dont le rendement en grains obtenu varie respectivement de 2,44 t/ha (T1), 1,65 t/ha (T3) à 1,28 t/ha (T2). En terme de tendance, la comparaison des

rendements moyens des traitements T1, T2, T3 montre que chez le maïs, le stress en phase végétative (T1) a moins d'impact sur le rendement que le stress en phase floraison (T3).

21.6. Alimentation hydrique et *efficience* d'utilisation de l'eau.

Les résultats des mesures du poids de matière sèche totale rapportés sur les consommations en eau (**ETR**) permettent de calculer l'efficience d'utilisation de l'eau par la plante. L'efficience est exprimée en kg de matière sèche par mm d'eau consommée. Le test statistique affiche ^{N=} ~~trois~~ groupes homogènes avec une meilleure efficacité pour le TO, suivi du traitement T1 (stress au stade végétatif) puis des traitements T2 et T3 stressés en floraison. Sur l'ensemble des traitements, l'ETM se distingue par un indice d'efficience de l'eau consommée de 6,5 kg/mm/ha (figure 16). Après le TO, le traitement T1 stressé en phase végétative a un régime hydrique plus **efficace** (5,2 kg/mm/ha) que le T2 (2,9 kg/mm/ha) et le T3 (3 kg/mm ha). Pour le T1, la récupération a été bonne et la réhydratation **durant** la phase critique améliore sensiblement son **efficience**. Le stress en période florale a un effet dépressif sur l'efficacité d'utilisation de l'eau chez les traitements T2 et T3. Ces résultats montrent que la production en grain de la SYNTHETIC-C est fortement liée aux conditions d'alimentation hydrique pendant la floraison. Cette phase très sensible au déficit hydrique peut entraîner une perte de rendement. †

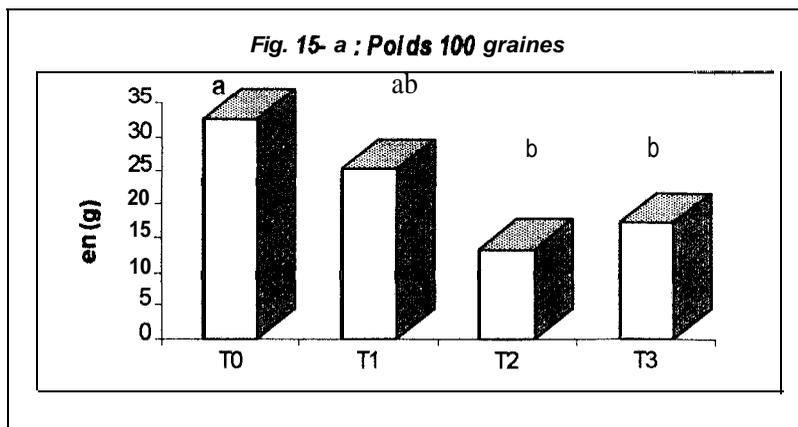


Figure 15 a°) : Poids 100 graines

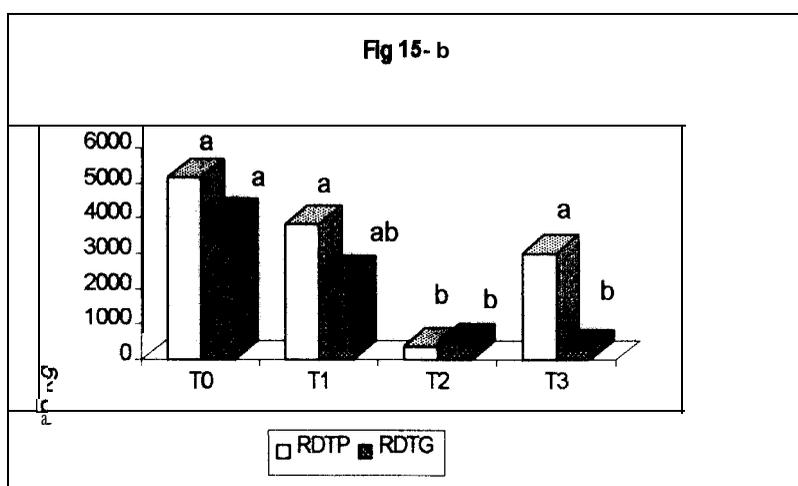


Figure 15 -b : Rendement en paille (RDTP) et rendement en grains (RDTG)

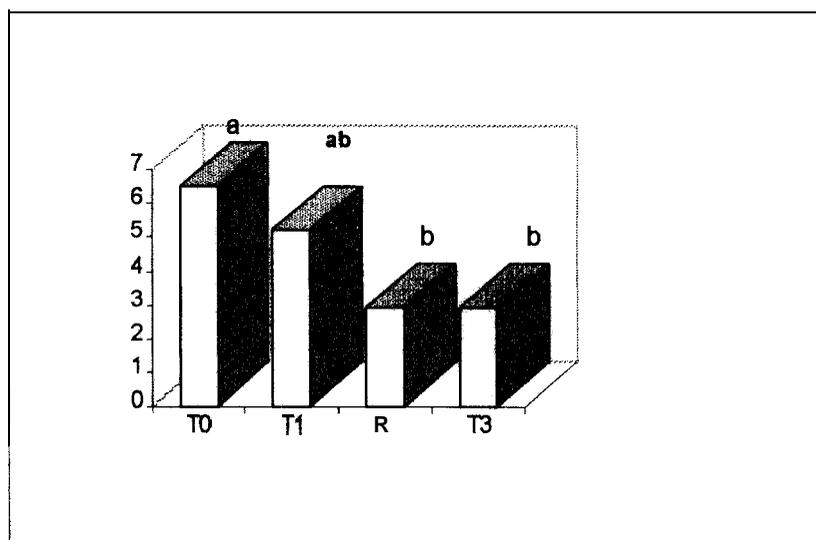


Figure 16 : Efficience d'utilisation de l'eau en fonction du régime hydrique

3. Discussion

La consommation en eau des plantes dépend de la demande évaporative et varie durant tout le **cycle** en fonction de l'**âge** physiologique de la plante. Cette demande climatique est de l'ordre de 7 à 9 mm/j sur le site expérimental. Pour le maïs, chaque stade de développement est caractérisé par un coefficient **cultural** (kc) qui en le multipliant par la demande climatique donne l'**ETM**, (Dancette, 1983). En l'absence de toute contrainte hydrique, l'**ETR** est égale aux besoins maximaux du maïs dans son milieu. C'est ce qu'on a pu déterminer pour TO où l'**ETR** est égale à 624,4 mm. Mais lorsque la contrainte hydrique pèse sur la culture, l'**ETR** suivant la demande évaporative et la disponibilité en eau du sol diminue considérablement (**T1**, **T2** et **T3**).

Il apparaît que les plus fortes baisses de rendement en grain du maïs sont imputables au déficit hydrique pendant la phase de floraison et de remplissage de grain. Doorenbos and Pruitt (1977), ont établi différents niveaux de baisse de rendement grains du maïs suivant les différents stades. La phase la plus critique pouvant entraîner des déficits de rendement importants à tous les niveaux est centrée autour de la floraison. Le stress appliqué sur les plants se manifeste aussi au niveau des feuilles par leur enroulement suivi d'un dessèchement progressif des bordures et d'une diminution de l'indice foliaire (figure 17 a). Cette carence **entraîne** une diminution des activités photosynthétiques de la feuille (Bretaud et al, 1991) et peut constituer un handicap sérieux pour les rendements.

Chez le traitement TO, on note un développement exubérant du couvert avec un fort indice foliaire, (figure 17 b). On remarque ainsi, au niveau du couvert, un différentiel de température plus **élevé**. Cette situation résulte du fait que n'ayant subi aucune contrainte hydrique dans le sol, les plants de maïs ont transpiré au maximum dissipant ainsi la radiation solaire reçue. Par contre sur les parcelles stressées, on note une élévation de température de couvert avoisinant ou dépassant parfois celle de l'air, lorsque la contrainte hydrique est plus marquée dans le sol. La plante ferme ses stomates et subit une charge radiative importante car elle est incapable à maintenir sa transpiration suite **à** une carence d'eau dans sa zone racinaire.

L'application du **deuxième** stress a **coïncidé** avec le **début** de la floraison (52 jas). A ce stade, il n'y a plus de **variations** significatives de la hauteur des tiges chez le maïs. Ceci peut être expliqué par un arrêt de croissance qui intervient à partir de la floraison (Millequant, 1980). Cette situation correspond à un risque de **sécheresse**

phase floraison remplissage de grains, encouru par les paysans en culture pluviale. Toutefois, d'après MOREL (1991), les plantes réagissent souvent au stress hydrique pour tenter d'assurer leur survie accompagnée d'une production minimale. Elles développent des mécanismes leur permettant à la fois d'augmenter l'absorption en eau (croissance racinaire en profondeur cas des traitements T2, T1 et T3) et de réduire les pertes en eau (fermeture des stomates). Depuis les travaux de Batcho et *al.* (1991), on sait que le mil laisse mourir ses talles extérieures et assure une production minimale sur la tige centrale en condition de stress hydrique. D'autre part, l'arachide ferme ses stomates et replie ses folioles, (Morel, 1991), et augmente la vitesse d'enracinement avec une redistribution linéaire et volumique du système racinaire (Annerose, 1990). Chez le maïs, la fermeture des stomates constitue un des mécanismes de régulation de perte en eau les plus performants, (Louguet, 1984). Ces résultats corroborent ceux obtenus par Hema (1990) sur l'adaptation à la sécheresse de quelques génotypes de maïs au CERAAS.

Au cours du stress en phase floraison, on a remarqué une amélioration nette du système racinaire permettant aux plants de puiser de l'eau en profondeur. La technique de carottage laborieuse mais très fiable a permis de trouver la profondeur d'extraction racinaire (PER) des différents niveaux de traitement. Chez les stressés en phase végétative et en phase floraison, pour faire face au déficit hydrique, les plants ont développé un système racinaire profond jusqu'à 100 cm. Cependant, la PER varie suivant les espèces cultivées et suivant le niveau de stress. C'est ainsi que chez les stressés en phase végétative, cette PER atteint 85 cm alors que chez le non stressé TO, elle est de 60 cm. Bien que les plantes stressées ont développé un système racinaire en profondeur, leur production reste toujours faible à cause du défaut de remplissage des grains lié à la réduction de 50 % environ de l'eau disponible dans le sol (ASW) au moment de la floraison. Debaeke *et al* (1996), ont montré que le défaut de remplissage du grain, cause d'un faible indice de récolte chez les céréales est étroitement lié à l'accélération de la sénescence des feuilles et à la fermeture des stomates après floraison. Chez le mil, Sarr (1997) a aussi mis en évidence que le rendement final en grain est fortement corrélé avec la satisfaction des besoins en eau durant le cycle et pendant la phase qui s'étend de la floraison mâle à la formation des graines. Dès lors, il apparaît que le rendement final est lié à l'état hydrique du sol au moment de la floraison et du remplissage des grains et que la floraison constitue donc la phase la plus sensible du cycle de développement du maïs la Synthétic-C.



Figure 17 a°): Effet du déficit hydrique en phase: végétative :
 -retard de croissance par rapport aux plantes à ETM
 -enroulement et dessèchement des feuilles
 -baisse de l'indice foliaire (0.9)

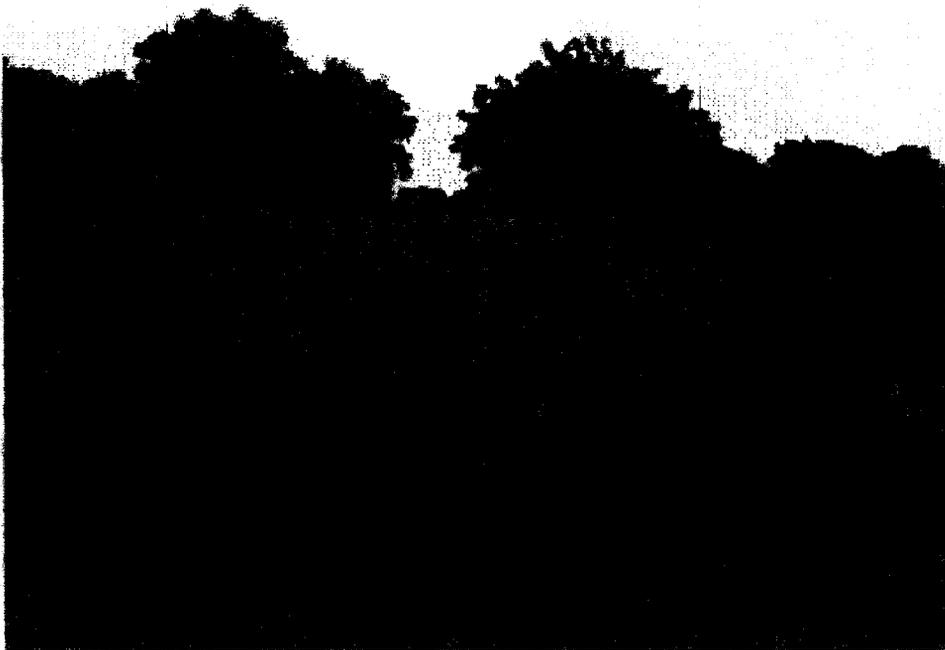


Figure 17 b°): plantes maintenues à ETM durant tout le cycle :
 -développement végétatif exubérant (vers la fin du stade végétatif, 44-48 jas)
 -fort indice de surface foliaire (2.80)

Conclusion et Perspectives

Au terme de cette étude, il ressort que l'utilisation du bilan hydrique, a permis d'estimer les besoins globaux en eau de la variété de maïs, SYNTHETIC-C et de définir son potentiel de production. Le régime hydrique qui a été appliqué simule les différentes formes de sécheresse que l'on pourrait rencontrer au cours d'une saison de culture. L'identification du déficit hydrique en phase florale comme affectant le plus le rendement permet de définir des dates optimales de semis pour mieux caler le cycle de développement de la SYNTHETIC-C dans la saison pluvieuse d'une zone donnée.

Les autres paramètres mis en relation avec les régimes hydriques, ont permis une meilleure compréhension de l'interaction **plante/environnement** et de sa réponse vis à vis des contraintes qu'imposent son milieu ambiant. Les résultats obtenus, indiquent une différence de sensibilité **suivant** le stade de développement. On a remarqué que le potentiel hydrique foliaire et le contenu relatif en eau sont très sensibles au déficit hydrique du stade végétatif (Bâ, 1997). Ce qui amène les plantes à fermer leurs stomates durant cette période pour réduire les pertes en eau.

La bonne efficacité d'utilisation en eau de la plante est observée chez le témoin TO avec un rendement en grain et en paille meilleur. Un stress en période végétative réduit moins le potentiel de rendement qu'un stress durant la floraison ; et ceci malgré une réhydratation post stress.

Les résultats sur la différence de profondeur d'extraction racinaire entre les plantes stressées et le témoin laissent penser qu'une étude comparative au cours du cycle de la dynamique du système racinaire de différents géotypes de maïs pourrait être intéressante.

Aussi, pour mieux valoriser les résultats de ce travail, des études **fréquentielles** sur la pluviométrie (cas de la Centrafrique, en cas d'introduction de cette variété) devraient être faites pour rechercher la durée utile de la saison des pluies, l'occurrence des épisodes secs en **début** et en fin de cycle et la date optimale de semis dans différentes zones agroécologiques.

BIBLIOGRAPHIE

- ANNEROSE D., 1990.-** Recherches sur les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (*Arrachis hypogea L.*) cultivée au Sénégal. Thèse de doctorat de Sciences Naturelles, Université de Paris VII, 282 p.
- ANNEROSE D., CLOUVEL P., MAYEUX A., 1996.-** Conduite de l'irrigation dans la région du Fleuve Sénégal. Approche physiologique et application à la culture de l'arachide. Atelier Base Centre Arachide-Ceraas : « L'arachide cultivée en zones sèches - Stratégies et méthodes d'amélioration de l'adaptation à la sécheresse » CNBA Bambey, Sénégal, 17-20 décembre.
- BA A., 1997.-** Réponses agrophysiologiques et efficacité d'utilisation de l'eau chez le maïs (*Zea mays L.*) variété Synthétic-c en conditions de déficit hydrique. mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur des travaux agricoles 44 p.
- BI PENE C., CHOFART J.L., ASSA A., 1997.-** Gestion de l'irrigation à la parcelle en culture de canne à sucre (*Saccharum officinarum L.*) sous climat tropical humide. In Sécheresse n° 2 vol. 8, juin 1997, 87-98.
- BRETAUDEAU A., TRAORE B.M., TRAORE S., TOURE O.S., KEITA M., 1991.-** Contribution à l'utilisation des paramètres morphologiques et agronomiques pour la sélection de variétés de sorgho résistantes à la sécheresse, 125 – 136. In *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*. John Libbey Eurotext Ed. Paris.
- CHARBONNIER G., 1984.-** Les mesures de température de surface à partir de l'infrarouge thermique. Interprétation en vue de mieux planifier l'irrigation des cultures. (note synthèse), mai 1984, IRHO/CIRAD, 42 p + annexes.
- CHOPART J.L., KONE D., 1991.-** Fluctuation de l'alimentation hydrique du maïs en région centre (Côte-d'Ivoire), 39-47. In *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*. John Libbey Eurotext Ed. Paris.
- CLAASSEN M.M., SHAW RH. 1970.-** Water deficit effects on corn. II Grain components *Agronomy Journal* 62, 652-655.
- CORTIER B. et al. 1988.-** Le maïs au Sénégal : effet des techniques culturales et des conditions hydriques en culture pluviale. *L'Agronomie Tropicale*, 43 (2) : 85-90 pp.

- DANCETTE C 1983.-** Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone Soudano-Sahélienne. *L 'Agronomie tropicale* 38 (4).
- DEBAEKE P., PUECH J., CASALS M.L. 1996 :** Elaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. I Etude en lysimètres. *Agronomie* 16, 3-23 p.
- DOORENBOS J. and PRUITT W.O., 1997.-** Crop water Requirements. FAO, Irrigation and drainage paper n° 24, 144 p.
- FOREST F., REYNIERS F.N. 1986.-** Proposals for the classification of agroclimatic situations of upland rice research, Proceedings of the 1985 Jakarta conference, 93-103 pp.
- HEMA I., 1990.-** Adaptation à la sécheresse du maïs. Rapport CERAAS.
- IDSO S.B., REGINATO, R.J., JACKSON RD., PINTER P.J., 1981.-** Foliage and air temperature : evidence for a dynamic «equivalence point » *Agric. Meteor.*, 24, 223-226 pp.
- ISRA/DR, 1995.-** Information pédologiques et étude cartographique des sols du CNRA de Bambey. Description et résultats d'analyse des profils pédologiques. Mai 1995, 41-42 pp.
- KWAMI A., 1991.-** Potentialité de la maïsiculture pluviale au Togo. In influence du climat sur les productions des cultures tropicales. Compte rendu du séminaire régional organisé par la Fondation Internationale pour la science et le Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale. 23-28 septembre 1991, Burkina Faso, 232-240 pp
- LECOEUR J., WERY J., SINCLAIR T.R 1995.-** Model of leaf area expansion in field Pea subjected to soil water deficits. *Agronomy journal* 88, 1, 7- 15.
- LOUGUET P., 1984.-** Inter-relations entre les mouvements des stomates et la résistance à la sécheresse chez les végétaux cultivés : cas du mil. In La sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée. Dakar, septembre 1984, CIRAD/ISRA : 591 P.
- MARONE E. 1994.-** Etude des relations hydriques entre le sol et la plante chez l'arachide pour une meilleure définition des concepts de sécheresse et de stress hydrique. Mémoire probatoire, ISRA/CERAAS, 54 p.
- MILLEQUANT A., 1980.-** Contribution à la connaissance des réactions morphologiques, physiologiques et biochimiques de jeunes plantes de deux hybrides de maïs soumis à une contrainte hydrique modérée et momentanée. Thèse de Docteur ingénieur «Sciences agronomiques» Institut National Agronomique Paris-Grignon, 89 pages.

MINISTERE DE LA COOPERATION FRANCAISE, 1991.- Mémento de l' Agronome, pp 651-665.

MONTENY B.A., 1991.- Evaluation de la consommation en eau de la canne à sucre pour l'amélioration de la production en région soudano-sahélienne, 129-144 «*Influences du climat sur la production des cultures tropicales*». Compte rendu du séminaire régional, organisé par la Fondation Internationale pour la Science (FIS) et le Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale (CTA). 23-28 septembre, Ouagadougou, Burkina Faso.

MOREL R, 1991.- Sécheresse et rendements des cultures. «*Influences du climat sur la production des cultures tropicales*». Compte rendu du séminaire régional, organisé par la Fondation Internationale pour la Science et le Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale. 23-28 septembre 1991, Ouagadougou, Burkina Faso, pp 209-218.

MORIZET. J., POLLACSEK M., TOGOLA D., 1983.- Tolérance à la sécheresse de 4 variétés de maïs. Essai de mise en évidence des mécanismes impliqués. 493-501. “*Physiologie du maïs!*” Communication au colloque physiologie du maïs organisé par l'INRA, le CNRS et l'AGPM. Royau 15- 17 mars, France.

POSS et al., 1988.- Bilan simulé du maïs au Togo méridional. *L' Agronomie Tropicale*, 43 (1) : 18-29 pp.

ROBELIN M. 1960.- Contribution à l'étude du comportement du maïs vis-à-vis de la sécheresse. A.G.P.M., 69-76.

ROBELIN M. 1983 : Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse, 445-476. In “*Physiologie du maïs*”. Communication au colloque organisé par l'INRA, le CNRS et l'ACPM du 15 – 17 mars.

SARR B., 1997.- Relations consommation 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 CERAAS, 11 pages.

VANDERCHMITT E., 1989.- Besoins en eau du maïs et de l'arachide à Nioro du Rip, hivernage 1989, 20 p.