Réponses agro-physiologiques et efficacité d'utilisation de l'eau chez le maïs *(Zea mays* L. *– cv. Synthetic-C)* soumis au déficit hydrique

M. Diouf[1], B. Sarr, O. Diouf, A. Bâ & H. Roy-Macauley

Keywords : Drought – Plant water status – Gaz exchanges – Water use efficiency – Productivity - Zea mays L. *cv. Synthetic-C.*

Résumé

*Au Sénégal, face à la baisse de la pluviométrie et la forte probabilité d'occurrence de périodes sèches au cours du cycle cultural, l'étude des réponses agro-physiologiques du maïs (*Zea mays *L. –* cv. Synthetic-C*) a été effectuée dans la zone du Bassin Arachidier. Le but de ce travail était de caractériser à l'échelle de la plante entière et de la culture, les réponses physiologiques d'une part, et d'évaluer l'efficacité de l'utilisation de l'eau consommée d'autre part. Le déficit hydrique a été appliqué respectivement pendant la phase végétative (T1), durant la phase reproductive (T3) et à la fois durant les phases végétative et reproductive avec une période de réhydratation entre ces dernières (T2). Pour les témoins (T0), un complément d'eau a été apporté par irrigation pendant les périodes de déficit pluviométrique pour maintenir des conditions hydriques optimales d'alimentation en eau des plantes pendant la croissance. Les quantités pour l'irrigation complémentaire ont été déterminées à partir de l'évapotranspiration bac et des coefficients culturaux du maïs pour différentes phases phénologiques.*

Les résultats ont permis de montrer que les réponses physiologiques et agronomiques de la Synthetic-C *face au déficit hydrique sont variables suivant le stade d'occurrence du stress. En effet, l'état hydrique interne des plantes (contenu relatif en eau – CRE - et potentiel hydrique foliaire - ψ -) et l'indice de stress de la culture (CWSI) ont été moins sensibles au stress hydrique avec une baisse plus modérée au cours de la phase florale qu'au cours de la phase végétative. En revanche, les échanges gazeux [conductance stomatique (Gs) et la transpiration (Tr)] se sont révélés plus sensibles au stade reproductif avec une chute plus marquée et permettant de distinguer les traitements considérés. Le rendement en graines et l'efficacité d'utilisation de l'eau ont indiqué une baisse significative pendant cette phase reproductive. En outre, sur la base des paramètres physiologiques et de la production, la* Synthetic-C *a manifesté une bonne capacité de reprise de ses fonctions après cessation de la contrainte hydrique en phase végétative ce qui semble témoigner de sa bonne plasticité.*

Summary

Agrophysiological Responses and Water Use Efficiency of Maize *(Zea mays L. – cv. Synthetic-C)* in Water Deficit Conditions

Senegal is known to have very low rainfall with high probability of drought occurring during crop development. The study on the growth of maize under water deficit conditions aimed at characterising its agro-physiological responses and the evaluation of its water use efficiency (WUE). A water deficit was applied respectively during the vegetative phase (T1), at flowering start (T3) and both during the vegetative phase and at flowering start (T2) with a period of rewatering between these two phases. For the control (T0) water was applied by irrigation to maintain optimal water conditions for growth. The amount of water to complete (in low rainfall conditions during the cycle) was determined by measuring "bac" evapotranspiration and using crop coefficient (Kc) for maize during the different phases.

The results show that Synthetic-C *variety was sensitive to water deficit during the flowering phase. Actually, the relative water content (RWC), leaf water potential (ψ) and crop water stress index (CWSI) were less sensitive to water deficit during the flowering phase than during the vegetative phase. These parameters showed a higher rate of decrease during the vegetative phase. On the other hand, gazeous exchanges [stomatal conductance (Gs) and transpiration (Tr)] were found to be more sensitive to water deficit during the reproductive stage. Moreover, significantly low grain yield and WUE were observed during this phase of development. However, on the basis of physiological parameters and productivity,* Synthetic-C *showed a good capacity to resume its physiological activities after rewatering during the vegetative phase, similar to a good plasticity of the control.*

[1] CERAAS, BP 3320 Thiès-Escale, Thiès (Sénégal). Tél. : (221) 951-49-93/94
Tél./Fax : (221) 951-49-95 e-mail ceraas@telecomplus.sn
Reçu le 12.10.99. et accepté pour publication le 01.08.01.

Introduction

Depuis les années 1970, la baisse de la pluviométrie constitue la principale limite pour l'agriculture des pays du Sahel. La sécheresse devenue chronique, contribue largement à l'accroissement du déficit céréalier des états sahéliens. En effet, en 1984-1985, le déficit vivrier atteignait 1 771 500 t dans les pays membres du Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) (11). Ces auteurs estiment ce déficit à plus de 3 millions de tonnes à l'an 2000 si la production agricole n'évolue pas. Pour permettre à ces pays d'être autosuffisants à l'avenir, les recherches se sont fixées comme objectif majeur d'atteindre dans ces conditions limitantes, un bon niveau d'efficacité de l'utilisation de l'eau par les cultures.

Au Sénégal, la zone de culture du maïs (*Zea mays* L.) correspond aux domaines soudano-sahélien et soudanien (400 à 900 mm) comme définis par Lecoeur *et al.* (10). Cette étude a porté sur la variété *Synthetic-C*, à base génétique large, résistante à la verse avec un potentiel de rendement de 4 $t.ha^{-1}$ (2). Cependant, on assiste à une fluctuation importante de ses rendements liée aux périodes de déficit hydrique intervenant au cours de son cycle. L'objectif de ce travail est d'une part, de caractériser les réponses agronomiques et physiologiques (état hydrique des plantes, potentiel hydrique foliaire et contenu relatif en eau, indice de stress de la culture ou CWSI, échanges gazeux et notamment la transpiration et la conductance stomatique) de *Zea mays* L. *cv. Synthetic-C* sous irrigation; et d'autre part, d'évaluer l'efficacité de l'utilisation de l'eau chez cette variété *Synthetic-C* en conditions de déficit hydrique pendant les phases végétative et reproductive.

Matériel et méthodes

Site expérimental

L'étude a été conduite à la station du Centre Nord Bassin Arachidier (CNBA) de Bambey (14°42'N et 16°28'O) pour les conditions expérimentales favorables qu'elle offre malgré le fait que la culture est surtout pratiquée dans les zones centre (Nioro du Rip) et sud du pays (Moyenne et Haute Casamance). Son climat est de type soudano-sahélien caractérisé par une saison sèche longue (8 à 9 mois: octobre à mai) et une saison pluvieuse courte (3 à 4 mois: juin à septembre). La température moyenne annuelle varie entre 21 et 38°C et la pluviométrie atteinte ou dépassée 2; 5 et 8 années sur 10, est successivement d'environ 571; 460 et 375 mm (source ISRA/Bambey: période 1966-1995). Le sol du site expérimental est de type dior modal, ferrugineux tropical faiblement lessivé. Sa teneur en argile varie entre 7,5 et 9,3% et son pH est compris entre 6 et 6,5 (3).

Matériel végétal et conduite de la culture

La variété de maïs *Synthetic-C* étudiée a été créée à l'ISRA de Bambey en 1982, et son cycle dure 90 jours. Sa tige peut atteindre 2,20 m de hauteur avec un nombre de feuilles de 14 à 16. La hauteur d'insertion de l'épi peut se situer jusqu'à 1,10 m. L'essai a été installé sur un précédent cultural cotonnier après un labour à sec de 20 cm de profondeur suivi d'un hersage. Le semis a été effectué en humide à raison de 2 graines par poquet après une pré-irrigation de 20 mm, le 08 juillet 1997 pour une géométrie de 0,8 m x 0,2 m avec des semences enrobées au granox (captafol 10%, benomyl 10% et carbofuran 20%) pour les protéger contre les champignons et les insectes. Le démariage à un pied par poquet, en humide, a eu lieu 15 jours après le semis (jas). Des sarclo-binages, un buttage pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'engrais et la résistance à la verse (41 jas), et des traitements phytosanitaires contre des criquets, des pucerons, des chenilles défoliatrices et des termites respectivement, avec du sumithion 500 CE (fénitrothion) $1l.ha^{-1}$, du spidane 500 (endosulfan) 660 $cc.l^{-1}$ et du thimul 35 (endosulfan) 2,5 $l.ha^{-1}$ ont été réalisés. Un apport de 200 $kg.ha^{-1}$ NPK (8-18-27) a été effectué au semis, et de l'urée (46-0-0) à la dose de 100 $kg.ha^{-1}$ au 27ème et au 41ème jas. L'irrigation a été assurée par un système de rampes oscillantes de six mètres de portée et les hauteurs d'eau apportées sont recueillies dans des pluviomètres installés dans chaque parcelle. Le pilotage hebdomadaire de l'irrigation a été réalisé à l'aide des logiciels Bipode Nema (IER-CIRAD-CA, version 4.04) et Excel. Pour ce faire, la relation ETM–ETR (en $mm.j^{-1}$); ETM ou évapotranspiration maximale de la *Synthétic-C* correspondant à une alimentation hydrique optimale et calculée à partir des coefficients culturaux (Kc) donnés par Vanderchmitt (14) pour différentes phases du cycle de développement et de l'évapotranspiration du bac (Evbac) mesurée sur une longue série climatique. L'évapotranspiration réelle (ETR) représente la consommation en eau de la culture. L'Evbac mesurée au niveau de la station météorologique au cours de l'essai correspond à la valeur de l'évaporation sur une nappe d'eau libre.

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est en blocs complets randomisés avec trois répétitions, soient 12 unités expérimentales de 6 m x 4,8 m chacune. Chaque parcelle unitaire comprend 6 lignes de 6 m avec des interlignes de 0,8 m et 2 lignes centrales forment le carré de rendement de 2 m x 1,6 m. Le facteur étudié est le régime hydrique, comprenant 4 niveaux :

- T0: (traitement témoin soumis au régime pluvial avec une irrigation complémentaire pendant les périodes à pluviométrie déficitaire pour maintenir les plantes dans des conditions d'alimentation en eau optimales durant tout le cycle).
- T1: (traitement stressé par couverture des parcelles en phase végétative: du 27ème au 42ème jas).
- T2: (traitement stressé par couverture des parcelles pendant la phase végétative puis la phase reproductive; les deux périodes de stress étant séparées par une période de récupération après la phase végétative).
- T3: (traitement stressé par couverture des parcelles en phase reproductive: du 52ème au 67ème jas).

Pendant les périodes d'application du stress, les parcelles stressées ont été recouvertes de bâches transparentes et imperméables à l'eau au moment des pluies et pendant la nuit. En raison de la baisse des températures nocturnes comprises entre 20 et 25°C d'une part, et de l'aération assurée sur une hauteur de 50 cm à la base du dispositif d'autre part, le bâchage n'a pas signi-

ficativement influencé le microclimat des plantes des traitements concernés.

Paramètres étudiés et techniques de mesure

Les paramètres climatiques ont été relevés quotidiennement à partir d'une station météorologique automatique de type Cimel. Le suivi de l'état hydrique du sol a été réalisé de manière hebdomadaire à l'aide d'un humidimètre à neutrons de type Troxler T7 à partir d'un tube d'accès de 4 m de long préalablement installé au milieu (position centrale) de chacune des parcelles élémentaires.
Les quantités d'eau réellement consommées par la culture ou évapotranspiration réelle (ETR) ont été estimées à partir de l'équation du bilan hydrique qui s'exprime comme suit :

$$ETR\ (mm.j^{-1}) = P + I + \Delta S \pm R \pm Dr;\ avec$$

P: la pluviométrie enregistrée au niveau d'une station météorologique située à 300 m de la parcelle expérimentale,
I: la quantité d'eau apportée par irrigation,
ΔS: la variation de stock d'eau mesurée entre deux dates différentes telle que S1 représente le stock mesuré à la date D1 et S2 celui mesuré à la date D2,
R: le ruissellement et
Dr: le drainage.
Il est à noter que R et Dr ont été négligés dans le cas de notre dispositif d'une part par un buttage des parcelles, et d'autre part, par l'installation des tubes d'accès à une profondeur que le front d'humectation ne dépasse pas (4 mètres).
Par ailleurs, l'eau disponible dans le sol ou Available Soil Water (ASW) exprimée en pourcentage a été calculée selon la formule proposée par Lecoeur *et al.* (9). Cette relation prend en compte les stocks d'eau à la profondeur d'extraction racinaire (PER), au point de flétrissement permanent (pF 4,2) et à la capacité au champ (pF 3) pour une profondeur donnée. Elle s'exprime comme suit :

$$ASW\ (\%) = (Stock\ PER - Stock\ pF\ 4,2)/(Stock\ pF\ 3 - Stock\ pF\ 4,2)$$

Les paramètres physiologiques (contenu relatif en eau, potentiel hydrique foliaire, conductance stomatique, transpiration et indice de stress) ont été mesurés une fois par semaine entre 11 h et 13 h en période d'alimentation en eau optimale et deux fois par semaine en période de déficit hydrique sur la 3ème feuille à partir du sommet de la tige.
Le contenu relatif en eau (CRE) a été déterminé au laboratoire par gravimétrie et exprimé en pourcentage suivant la méthode de Weatherley (15), puis calculé à partir de la relation

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

PF: poids frais de l'échantillon (disque foliaire prélevé à l'emporte-pièce) en mg,
PS: poids de l'échantillon après séchage à l'étuve à 85°C pendant 24 heures exprimé en mg,
PT: poids de l'échantillon à pleine turgescence en mg après séjour pendant une nuit à 4°C dans de l'eau distillée et à l'obscurité.
Le potentiel hydrique foliaire (Ψ) a été déterminé au champ au moyen d'une presse hydraulique de type Campbell J-14 et est exprimé en unité de pression qui est le mégapascal (MPa). La mesure a consisté à prélever un morceau de feuille d'un côté de la nervure principale de la 3ème feuille en partant de l'extrémité de la tige de la plante, puis à l'introduire, entre deux feuillets de papier buvard, dans la chambre de mesure étanche de la presse. Par la suite, une pression mécanique est exercée sur l'échantillon jusqu'à l'apparition de taches humides au niveau des extrémités des nervures secondaires correspondant à l'émission de la sève, donc à l'énergie nécessaire pour extraire l'eau du tissu végétal et la porter à l'état libre. Cette mesure a été réalisée sur 3 plantes pour chaque traitement et à chaque date du suivi.
La résistance stomatique (Rs) et la transpiration foliaire (Tr) ont été déterminées de manière automatique à l'aide d'un poromètre à diffusion à régime stationnaire Licor-1600 ou steady state porometer (Licor Inc., Lincoln, Nebraska, USA) ; puis la conductance stomatique (Gs) a été calculée à partir de la relation : $Gs\ (cm.s^{-1}) = 1/Rs\ (s.cm^{-1})$. Les mesures ont été effectuées sur la 3ème feuille (en partant de l'extrémité de la tige de la plante) en enfermant celle-ci dans la chambre de mesure de l'appareil dont l'ouverture est exposée au soleil, et en réalisant l'état d'équilibre qui doit précéder la mesure automatique. Cette mesure des échanges gazeux a été répétée sur 5 plantes.
Les mesures de la température du couvert et du différentiel de température entre le couvert végétal et l'air ambiant (Tc-Ta en °C) ou ΔT ont été effectuées à l'aide du radiothermomètre infrarouge type Telatemp AG 42 avec 4 répétitions par parcelle avec un angle de visée de 30° sur une distance d'environ 2 m. Les températures sèche et humide de l'air ont été déterminées à partir d'un psychromètre ventilé, et utilisées pour le calcul du déficit de pression de vapeur (DPV en mb) grâce au logiciel Sanji version 5 Béta-test. Les couples de valeurs (Tc-Ta)- DPV obtenus à partir des mesures réalisées concomitamment sur des parcelles en condition d'alimentation hydrique optimale et sur des parcelles sévèrement stressées, ont permis de déterminer la ligne de base (Figure 1) à partir de laquelle l'indice de stress de la culture ou Crop Water Stress Index (CWSI) défini par Idso (6) a été obtenu.

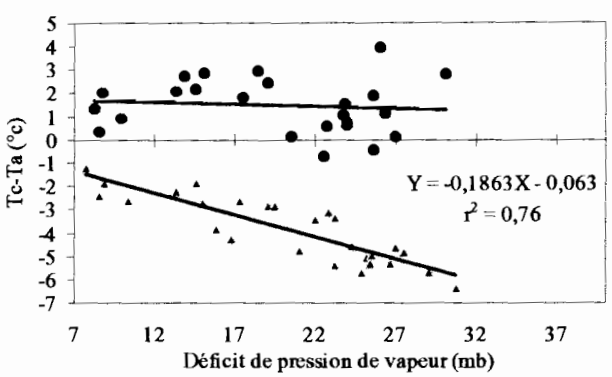

Figure 1 : Evolution du différentiel de température entre le couvert végétal et l'air ambiant en fonction de la demande évaporative. T0 à T3: traitements hydriques appliqués (voir dispositif expérimental).

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. Ce rapport indique le niveau de transpiration de la culture pour des valeurs du CWSI comprises entre 0 (alimentation hydrique maximale) et 1 (stress hydrique extrême).

Le rendement de la variété (RDT) pour les différents traitements considérés et ses composantes (nombre de graines par mètre carré ou NGM², et le poids de mille graines ou PMG) ont été déterminés à la récolte.

Analyse des résultats

Les données obtenues ont été analysées à l'aide du logiciel STAT-ITCF suivant le processus d'analyse de variance (ANOVA), et le test de comparaison des moyennes multiples de Newman-Keuls au seuil de 5%.

Résultats

Une pluviométrie de 397 mm déficitaire de 63 mm par rapport à la moyenne de la série 1966-1995 a été enregistrée, et correspond à une récurrence de 8 années sur 10. Les températures minimales mesurées à l'échelle horaire ont été comprises entre 21 et 25,5°C et les températures maximales entre 27,6 et 38,7°C. Les humidités relatives mesurées à l'échelle horaire ont varié entre 37 et 81% pour les minima et entre 84 et 100% pour les maxima.

Consommation en eau des plantes et disponibilité de l'eau du sol

La figure 2a permet de remarquer que sur l'ensemble des traitements, la consommation journalière ou ETR de 8 mm.j^{-1} est quasiment la même à 27 jas. En revanche, l'application du stress a entraîné une diminution de l'ETR des plantes des traitements T1 (1,8 mm.j^{-1}) et T2 (0,8 mm.j^{-1}) à 41 jas, alors qu'elle était très voisine de 10 mm.j^{-1} pour T0 et T3. Au 62ème jas, l'ETR de T2 et T3 alors stressés atteint la valeur de 1,9 mm.j^{-1}, pendant que T0 et T1 présentent une ETR de l'ordre de 7 mm. j^{-1} (Figure 2a).

Cette baisse de l'ETR, induite par un déficit hydrique du sol, s'explique par une faible disponibilité en eau du sol matérialisée par la chute concomitante de ASW chez les plantes stressées. La figure 2b montre l'évolution du ASW au cours du cycle pour les différents traitements appliqués. Il apparaît que la contrainte hydrique provoque toujours une chute brutale de ASW. Ainsi, celui-ci atteint des valeurs seuils très faibles au 41ème jas (T1: 40% ; T2: 49%) et au 62ème jas (T2: 50% ; T3: 45%) correspondant respectivement au stress en phases végétative et reproductive. Chez les témoins (T0), l'irrigation de complément au cours du cycle a permis de maintenir une bonne disponibilité de l'eau du sol pour les plantes avec un taux presque constant et voisin de 75%.

Pendant la phase de réhydratation, on note que la reprise de la consommation est plus rapide et plus complète après le stress en phase végétative qu'à la suite du stress en phase reproductive, mais aussi est bien corrélée à ASW (Figure 2).

Les résultats de l'indice de stress hydrique des cultures (CWSI) montrent une nette différence entre Tc-Ta du couvert des plantes stressées et celui des plantes non stressées. En effet, sur les parcelles T0, on note une baisse de Tc-Ta avec une augmentation du DPV. Le CWSI varie de 0 à 0,2 pour les témoins T0 durant tout le cycle, et de 0 à 0,07 (51 jas) chez les T3 avant l'application du stress (Figure 3). Au cours du stress en phase de floraison, les valeurs du CWSI pour le même traitement T3 ont varié de 0,47 à 0,69.

Pour T1 (stress en phase végétative), le CWSI atteint la valeur de 1 à 41 jas pour un Tc-Ta de –3,49°C et un DPV moyen de 14,90 mb. Le traitement T2 (stress en phase végétative et en phase de floraison) présente des valeurs du CWSI variant entre 0 et 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 traduisent la sévérité du stress.

Réponses physiologiques au déficit hydrique

Le stress hydrique appliqué pendant la phase végétative a engendré, pour le CRE, une différence significative entre les traitements à partir du 7ème jas (F11/3 = 25,01***, α= 5%), jusqu'à la reprise de l'irrigation au 15ème jour de stress. Le CRE qui était de 95%

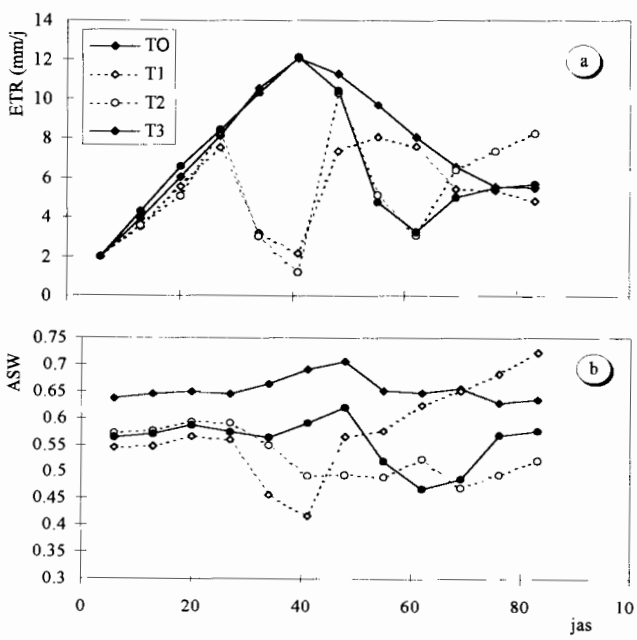

Figure 2: Evolution de la consommation en eau du maïs ou ETR (a) et de l'eau disponible ou Available Soil Water –ASW- (b) au cours du cycle cultural pour les différents traitements. T0 à T3: traitements hydriques appliqués (voir dispositif expérimental).

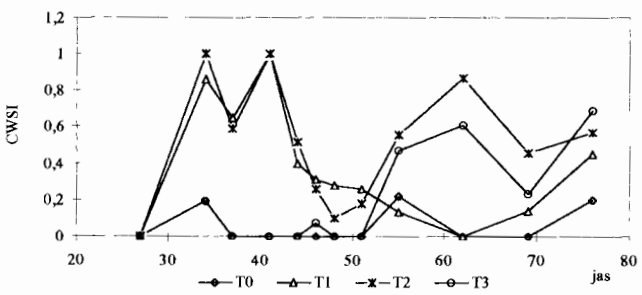

Figure 3: Evolution de l'indice de stress hydrique (CWSI) au cours du cycle cultural pour les différents traitements. T0 à T3 : traitements hydriques appliqués (voir dispositif expérimental).

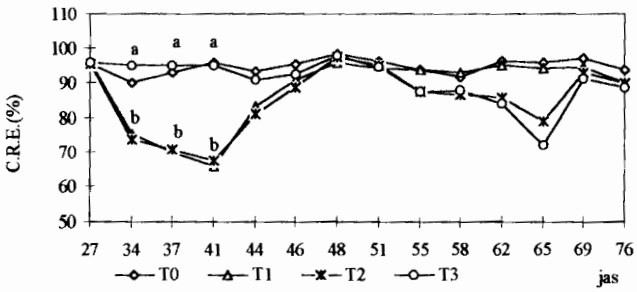

Figure 4: Evolution du Contenu Relatif en Eau (CRE) au cours du cycle cultural pour les différents traitements hydriques. T0 à T3: traitements hydriques appliqués (voir dispositif expérimental).

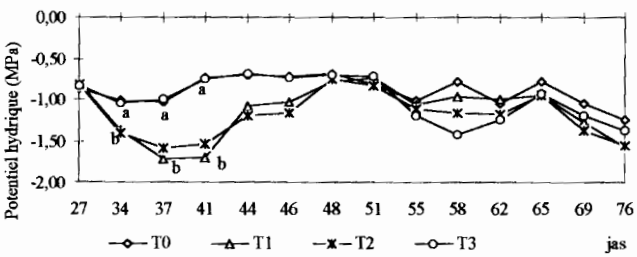

Figure 5: Evolution du potentiel hydrique foliaire au cours du cycle cultural pour les différents traitements hydriques. T0 à T3: traitements hydriques appliqués (voir dispositif expérimental).

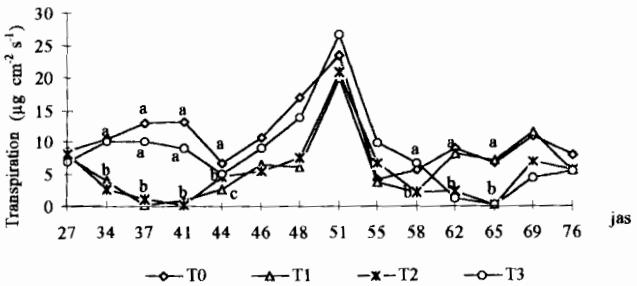

Figure 6: Evolution de la transpiration foliaire au cours du cycle cultural pour les différents traitements. T0 à T3: traitements hydriques appliqués (voir dispositif expérimental).

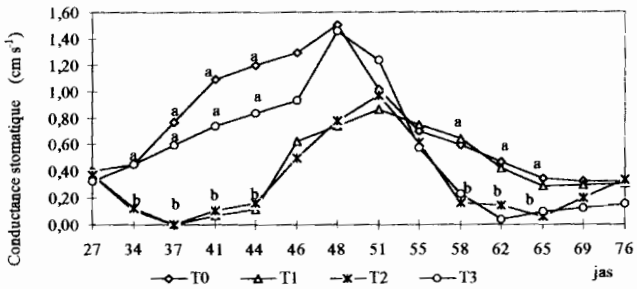

Figure 7: Evolution de la conductance stomatique au cours du cycle cultural pour les différents traitements. T0 à T3: traitements hydriques appliqués (voir dispositif expérimental).

le 1er jour de l'arrêt de l'irrigation pour tous les traitements est passé de 75,7 à 66% entre le 7ème et le 15ème jour de stress pour T1, et de 74 à 67,7% pour T2. Par contre, au 3ème jour de la reprise de l'irrigation, l'effet du stress disparaît (Figure 4). L'analyse sur l'évolution du CRE en floraison ne permet pas de mettre en évidence un écart significatif entre traitements.

Le potentiel hydrique foliaire (Ψ) montre une différence significative entre les plantes bien alimentées (T0 et T3) et celles stressées (T1 et T2) pendant le déficit hydrique en phase végétative (Figure 5). En effet, entre le 7ème et le 15ème jour de stress, le test de Newman-Keuls a permis de déterminer deux groupes homogènes identiques à ceux obtenus pour le CRE. Ainsi, le Ψ des plantes T2 varie entre -0,80 et -1,60 MPa, tandis que celui des plantes T1 passe de -0,80 à -1,72 MPa. Au 3ème jour après l'arrêt du stress, comme pour le CRE, l'effet traitement ne s'exprime plus. Pendant la floraison, on constate une autre chute du potentiel indifféremment du traitement.

L'évolution de la transpiration (Figure 6) et de la conductance stomatique (Figure 7) au cours des différentes phases de stress et pendant la récupération indique une sensibilité des échanges gazeux au stress hydrique. Entre le 7ème et le 15ème jour suivant le premier stress, on distingue significativement ($F= 38,89^{***}$ à $\alpha= 5\%$) les irriguées (T0 et T3) des stressées (T1 et T2). T0 et T3 ont un effet quasi similaire mais différent de celui de T1 et T2. Au 10ème jour après l'initiation du stress, Tr et Gs des traitements T0 et T3 augmentent régulièrement et atteignent respectivement 13 $\mu g.cm^{-2}.s^{-1}$ et 10 $\mu g.cm^{-2}.s^{-1}$ puis 0,77 $cm.s^{-1}$ et 0,59 $cm.s^{-1}$, alors que T1 et T2 indiquent une évolution inverse de Tr et Gs. Gs atteint une valeur nulle dès le 10ème jour de stress tandis qu'une transpiration résiduelle de l'ordre de 0,3 $\mu g.cm^{-2}.s^{-1}$ est maintenue. Au 3ème jour de la reprise, Gs et Tr augmentent à nouveau matérialisant ainsi la phase de récupération. Suite à la réhydratation, il n'existe plus de différences significatives entre les traitements, puis Gs et Tr continuent à augmenter pour atteindre leur optimum avec le début de la floraison.

Pendant la floraison, l'analyse révèle une différence significative entre les traitements. Gs est de l'ordre de 0,04 $cm.s^{-1}$ pour les plantes sur traitement T3 et de 0,15 $cm.s^{-1}$ pour les plantes stressées deux fois (T2). Parallèlement, la conductance moyenne des plantes non stressées est égale à 0,47 $cm.s^{-1}$. Par ailleurs, la différence entre les stressées et les non stressées pour Gs et Tr est significative ($F11/3 = 15,42^{**}$, $\alpha= 5\%$). Ces différences se sont d'ailleurs maintenues pendant neuf jours après la levée du stress. A partir de la floraison, on remarque une seconde baisse de l'amplitude de ces paramètres du fait du 2ème stress (T2 et T3). Cette chute, même si elle est plus accentuée chez les stressées (Gs de 0,9 à 0,1 $cm.s^{-1}$: T2 ; de 1,5 à 0 $cm.s^{-1}$: T3, et Tr de 20 à 2,5 $\mu g.cm^{-2}.s^{-1}$: T2 ; de 27 à 2,5 $\mu g.cm^{-2}.s^{-1}$: T3) que chez les irriguées (Gs de 1,5 à 0,5 $cm.s^{-1}$: T0 ; de 0,9 à 0,5 $cm.s^{-1}$: T1, et Tr de 25 à 10 $\mu g.cm^{-2}.s^{-1}$: T0 ; de 20 à 10 $\mu g.cm^{-2}.s^{-1}$: T1) se manifeste sur tous les traitements. En fait, la réduction accusée par les traitements bien alimentés est imputable à la sénescence qui accompagne la phase reproductive. Ainsi, on peut considérer que le flux transpiratoire est lié à l'âge des plantes, puisque les témoins (T0) montrent une chute de Tr et Gs à partir de la floraison.

Après le stress en phase floraison (9 jours), Gs (0,10 à 0,30 $cm.s^{-1}$) et Tr (0 à 5 $\mu g.cm^{-2}.s^{-1}$) ont montré une faible réaction à la réhydratation, période pendant laquelle la sénescence s'accentue.

Efficacité d'utilisation de l'eau et rendement

Les résultats obtenus mettent en évidence une importante variation des quantités d'eau consommées au cours de la contrainte hydrique (Tableau 1). L'effet trai-

tement est significatif, et distingue trois niveaux de consommation en eau (625 mm pour T0; 553 mm pour T3; et 465 puis 430 mm pour respectivement T1 et T2). On peut donc constater que les quantités d'eau consommées par les plantes du traitement T3 (stressées en floraison) sont plus élevées que celles consommées par T1 (stressées en phase végétative).

Globalement, le stress hydrique est couplé à une diminution importante de l'efficacité d'utilisation de l'eau par la *Synthetic-C* avec une meilleure efficacité pour T0 (6,5 $kg.ha^{-1}.mm^{-1}$), puis T1 (5,2 $kg.ha^{-1}.mm^{-1}$) et enfin, T2 et T3 avec respectivement 2,9 et 3 $kg.ha^{-1}.mm^{-1}$ (Tableau 1). Le nombre de graines par mètre carré et le poids de 100 graines indiquent une meilleure performance pour T0 et une évolution similaire à celle du rendement et de E.U.E. Le plus grand rendement en graines est obtenu avec T0 (4,05 $t.ha^{-1}$) et T1 manifeste une perte de rendement moins forte avec 2,44 $t.ha^{-1}$, puis T2 et T3 montrent des rendements similaires respectivement de 1,28 $t.ha^{-1}$ et 1,65 $t.ha^{-1}$ (Tableau 1).

Tableau 1
Consommation en eau et rendement en graines pour les différents traitements hydriques. T0 à T3: traitements hydriques appliqués (voir dispositif expérimental)

Traitement	ETR_{cycle} (mm)	NGM^2	PMG (g)	RDT ($t.ha^{-1}$)	E.U.E. ($kg.ha^{-1}.mm^{-1}$)
T0	625	1240 a	32,7	4,05a	6,5
T1	465	763,7b	25,2	2,44b	5,2
T2	430	324,7c	13,3	1,28c	2,9
T3	553	315,3c	17,7	1,65c	3

ETR cycle: évapotranspiration réelle (consommation en eau) pendant tout le cycle;
NGM2: nombre de graines par mètre carré;
PMG: poids de mille graines;
RDT: rendement;
E.U.E.: efficacité d'utilisation de l'eau;
T0 à T3: traitements hydriques appliqués (voir dispositif expérimental).
Les valeurs affectées des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% d'après le test de Newman-Keuls.

Discussion

Au cours du cycle cultural, les résultats ont montré une diminution de la consommation en eau (ETR) pour T1, T2 et T3. Cette baisse est liée au dessèchement du sol qui est confirmé par l'évolution de ASW et du CWSI. Parallèlement, les autres paramètres physiologiques ont révélé des réponses variables selon le stade d'application de ce stress. Pendant la phase végétative, le CRE et y ont été très sensibles au déficit en eau. On note globalement pour T1 et T2, une diminution significative à partir du 7ème jour de stress, et ceci jusqu'au 15ème jour; ce qui pour Ψ, rejoint les résultats de Landi *et al.* (8). Par ailleurs, pour les deux paramètres, cette chute est suivie d'une bonne récupération en phase végétative dès le 3ème jour suivant la reprise de l'irrigation. Toutefois, il faut signaler que la sensibilité de Ψ au stress est réduite au stade floraison, et on observe plus de différence entre les traitements avec Ψ qui continue à chuter même après la réhydratation. Ceci pourrait traduire une déshydratation des feuilles (baisse de turgescence) du fait de la sénescence.

Ces résultats traduisent selon Landi *et al.* (8) une plus grande sensibilité du CRE et de Ψ au stress en phase végétative qu'en phase de floraison de même durée (15 jours). Ils traduisent une bonne capacité de récupération de la *Synthetic-C* après une sécheresse de quinze jours pendant la phase végétative.

En outre, la stabilité de Ψ entre le 10ème jour et le 15ème jour de stress pendant que le CRE diminue, semble témoigner de l'existence du phénomène d'ajustement osmotique. Ceci semble être confirmé par l'évolution du CRE et de Ψ pour T2 entre le premier et le second stress. Comparativement à T3 et T1, T2 présente au cours du second stress des valeurs moins basses de ces paramètres. L'ajustement osmotique permet, par une modification de la composante osmotique de Ψ, de maintenir un niveau de turgescence relativement élevé pendant le déficit hydrique. Ce mécanisme a d'ailleurs été mis en évidence chez plusieurs génotypes de maïs (12; 13).

Tout comme le CRE et Ψ, Gs et Tr, avec une évolution similaire, ont été très sensibles au déficit hydrique comme évoqué par Ackerson et Krieg (1) et Robelin (13). A partir du 10ème jour (37 jas) de stress, on constate que les stomates se ferment. La conductance stomatique devient nulle, mais une transpiration résiduelle de l'ordre de 0,3 $\mu g.cm^{-2}.s^{-1}$ s'observe. Cette transpiration d'une intensité moindre serait probablement d'origine cuticulaire, et confirmerait les résultats obtenus par Hema (5) sur quelques génotypes de maïs.

La sensibilité de Gs et Tr au stress se maintient même pendant la floraison, contrairement au CRE et au Ψ. Ce dernier résultat s'oppose aux travaux de Ackerson et Krieg (1) qui montrent que les stomates du maïs ne sont plus sensibles au stress en floraison. D'autre part, Gs et Tr montrent une plus faible capacité de récupération (plus lente et moins complète).

Les valeurs seuil de CRE, de Ψ et de CWSI correspondant à cette fermeture stomatique en phase végétative sont respectivement 70%, -1,7 MPa et 0,85 à 1. L'augmentation du CWSI observée en fin de cycle chez les plantes irriguées et celles stressées puis réhydratées, serait liée à la sénescence fortement corrélée à la diminution de la transpiration foliaire.

La récupération observée sur ces paramètres physiologiques traduirait le maintien l'intégrité des structures cellulaires. On constate que le stress appliqué pendant le stade végétatif a moins d'impact sur la production que celui appliqué pendant la phase de floraison. Ceci pourrait s'expliquer par une très bonne récupération exprimée par les plantes au niveau physiologique. Par ailleurs, les résultats montrent que le stress hydrique réduit considérablement le rendement en graines et ses composantes pendant la phase de floraison. Ce qui confirme les résultats de Hall *et al.* (4) et Robelin (13) sur la plus grande sensibilité de cette phase à la contrainte hydrique. En effet, à ce stade, le déficit hydrique induirait un mauvais remplissage des graines, donc une moins bonne production.

La diminution de l'activité photosynthétique, donc de la production, probablement induite par le déficit hydrique par l'intermédiaire de la régulation stomatique serait donc responsable de la baisse de rendement observée chez la *Synthetic-C.* L'action synergique de ces paramètres induit un faible niveau du rendement en graines et de ses composantes, surtout pour les plantes stressées en floraison. Ce qui témoigne donc de la plus grande sensibilité de la *Synthetic-C* au déficit hydrique au cours de la phase florale. Quant au traitement T2,

cette forte réduction s'explique par l'effet additif des 2 cycles de déficit hydrique subis.

Conclusion

Pendant le déficit hydrique, la *Synthetic-C* révèle une très grande sensibilité des paramètres physiologiques et agronomiques associée à une bonne capacité de récupération qui traduirait en une bonne tolérance protoplasmique. Par ailleurs, en corollaire à la baisse de l'efficience de l'eau, le rendement en graines et ses composantes ont montré une réduction significative après un stress en phase de floraison. Cette phase apparaît ainsi comme la phase critique du cycle de cette variété de maïs. Il ressort également qu'au cours du stress, la *Synthetic-C* développe, entre autres, une stratégie d'évitement plus efficiente en phase végétative (perte de rendement de 53%) qu'en phase reproductive (perte de rendement de 87%).

Références bibliographiques

1. Ackerson R. C. & Krieg D.R., 1977. Stomatal and nonstomatal regulation of water use in cotton, corn and sorghum. Plant Physiology 60, 850-853.
2. Camara P.A., 1993. Catalogue des variétés de maïs créées par l'ISRA/Sénégal, 16 p.
3. Dancette C., Vachaud G., Sonko S. & Thony J. L., 1978. Méthodes de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. Annales Agronomiques 29, 1-36.
4. Hall A. J., Lemcoff J. H. & Trapani N.,1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. Maydica 26, 19-38.
5. Hema I., 1990. Adaptation à la sécheresse du maïs. Rapport CERAAS, 18 p.
6. Idso S.B., 1982. Non water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. Agricultural Meteorology 27, 59-70.
7. Jost S. & Gabas J.-J., 1997. Campagne agricole 1996 - 1997; récoltes céréalières moyenne au Sahel. Bulletin d'information Club du Sahel 16. p.30.
8. Landi P., Conti S., Gherardi M., Sanguineti M. C. & Tuberosa R., 1995. Genetic analysis of leaf ABA concentration and of agronomic traits in maize hybrids grown under different water regimes. Plant Cell Environment 40, 179-186.
9. 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.
10. Le Houérou H.N., 1989. The grazing land ecosystems of the african Sahel, Ecological Studies 75. Springer-Verlag, Berlin. Paris, Tokyo, New York, Hong Kong, 282 p.
11. Loynet G. & Kere A., 1991. Amélioration variétale du mil, sorgho, niébé et du maïs au Sahel: 1984-1985. Synthèse des résultats et bibliographie sélective, [50p.].
12. Millequant A., 1980. Contribution à la connaissance des réactions morphologique, physiologique et biochimique de deux hybrides de maïs soumis à une contrainte hydrique modérée et momentanée. Thèse Docteur Ingénieur Sciences Agronomiques, INA, Paris-Grignon, 80p.
13. Robelin M., 1984. Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse, in: Physiologie du maïs, INRA, Paris, 445-476.
14. Vanderchmitt E., 1989. Besoins en eau du maïs et de l'arachide à Nioro du Rip. Hivernage 1988, 20p.
15. Weatherley P.E., 1950. Studies in the water relations of the cotton plant. 1. The field measurement of water deficits in leaves. New Phytologist 40, 81-97.

Diouf M., Sénégalais, Doctorat de 3ème cycle, Chercheur-enseignant, Ecophysiologiste.

Sarr B., Sénégalais, Doctorat d'Université, Chercheur-enseignant, Agro-climatologue.

Diouf O., Sénégalais, Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA), Chercheur-enseignant, Physiologiste.

Bâ A., Sénégalais, Diplôme d'Ingénieur des Travaux Agricoles (ITA), Technicien du Développement Rural.

Roy-Macauley H., Sierra Léonnais, Doctorat d'Université, Chercheur-enseignant, Biochimiste, Directeur du CERAAS.