

Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert de maïs au Sénégal

Cet article présente les possibilités offertes par le couplage des données de la température du couvert, mesurées par télédétection rapprochée par radiothermométrie infrarouge, et du bilan hydrique du sol et des cultures pour, d'une part, appréhender la réponse du maïs au stress hydrique et, d'autre part, améliorer la gestion des apports en eau. Ce travail est d'un intérêt certain pour un pays comme le Sénégal qui fait face à la sécheresse et dont la politique agricole doit s'orienter de plus en plus vers la culture irriguée afin de diversifier la production agricole en introduisant, entre autres, le riz, l'arachide et le maïs.

Au Sénégal, le maïs est cultivé dans divers environnements agro-climatiques [figure 1]. Dans le système pluvial, cette culture est pratiquée au sud de l'isohyète 600-700 millimètres [1], tandis que la culture irriguée est liée à la disponibilité en eau consécutive, à la mise en place d'aménagements hydro-agricoles dans le delta et la vallée du fleuve Sénégal. Cependant, il est souvent difficile de cultiver le maïs dans le contexte de sécheresse qui sévit en Afrique depuis les années 70.

Au cours du cycle cultural, des déficits hydriques affectent la croissance, le développement et, à terme, la production du maïs. Sa période de haute sensibilité au manque d'eau commenterait approximativement une semaine avant la floraison et se terminerait deux semaines après celle-ci [2]. En outre, certains travaux montrent que le rendement du maïs est lié aux indices de satisfaction des besoins en eau (évapotranspiration réelle/évapotranspiration maximale, ou ETR/ETM) au cours du cycle et particulièrement pendant la phase critique [3].

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que le maïs est très sensible au déficit hydrique et que sa culture ne peut réussir qu'en zone bien arrosée où les conditions hydriques ne sont pas limitantes. Ainsi, c'est une plante à « problème hydrique » et à sensibilité très variable au cours du cycle cultural.

Jadis effectuée autour des cases, la culture du maïs se fait de plus en plus en plein champ actuellement. Les superficies emblavées se sont élevées à environ 100 000 ha au cours des deux dernières décennies. En raison de nombreuses contraintes d'ordre édaphique, climatique et organisationnel, les rendements en milieu paysan ont baissé de 11 %, passant en moyenne de 12 611 kg/ha de 1984 à 1990 à 11 122 kg/ha pour la période 1991-1996.

Face à un environnement climatique tropical de plus en plus hostile aux cultures, la recherche de solutions permettant d'atténuer les effets de la sécheresse sur le maïs demeure une préoccupation constante.

Benoît SARR
Omar DIOUF
Macoumba DIOUF
Harold ROY-MACAULEY

IRRAAS/CORAF/ISRA - BP 3320, Thies
Es-Saïda - Sénégal

Sylvain NDIJENDOLE

IRRA,
BP 127
Bangui - République centrafricaine

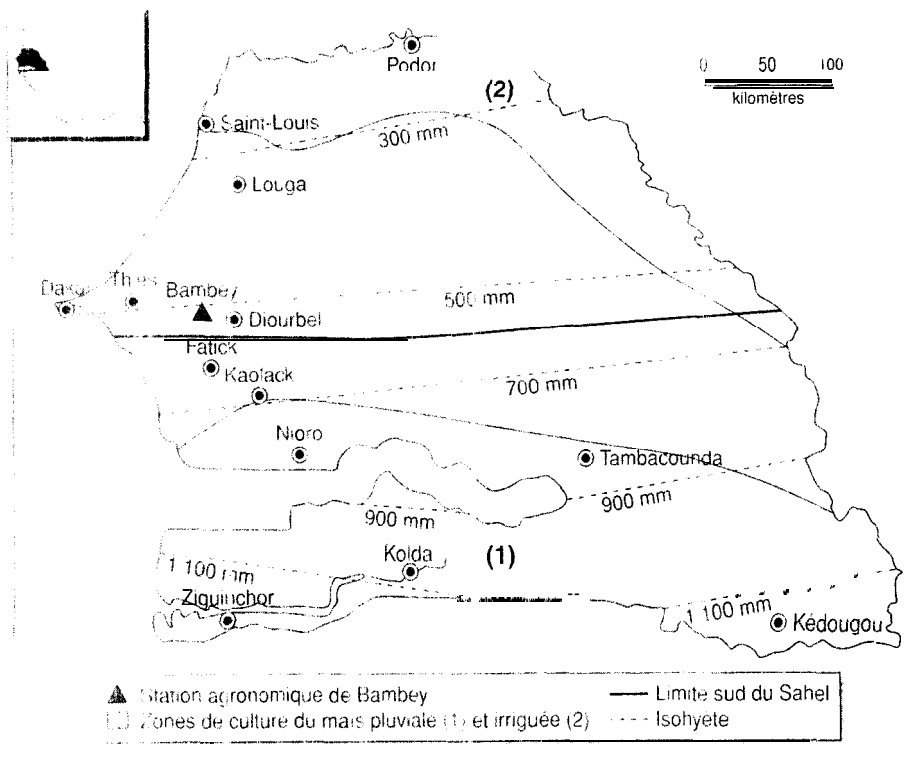


Figure 1. Zones de culture du maïs et cumuls pluviométriques moyens (1950-1997) au Sénégal

Objectifs

Cette étude a donc été conduite afin d'identifier des critères agrobioclimatiques et physiologiques de gestion optimale de l'eau en zones sèches en vue d'améliorer la production agricole. La mise en évidence de liens entre paramètres du sein du système eau-sol-plante permet de définir des valeurs seuils pour déclencher précocement l'irrigation et de déterminer des stades de sensibilité critique du maïs au déficit hydrique.

Matériel et méthodes

Matériel

L'expérimentation a été menée au champ, à Bambey, en 1997 (14° 42' N, 16° 28' E). Elle a porté sur la variété de maïs Synthetic-C dont le cycle dure 90 jours, qui est le produit d'une sélection réalisée en 1982 par l'Institut sénégalais de recherches agricoles (ISRA) et qui a été largement adoptée par les agriculteurs à cause de son rendement potentiel élevé (supérieur à 4 t/ha). Le climat de cette localité est caractéristique de la zone sahélienne avec

deux saisons bien contrastées : la saison des pluies de juin à octobre, à répartition unimodale et dont le maximum se situe entre août et septembre, et la saison sèche de novembre à mai. Au cours de l'hivernage (saison des pluies au Sahel), les conditions climatiques ont été suivies à l'aide d'une station météorologique automatique de type Cimel située à 300 mètres de l'essai. L'hivernage a été caractérisé par une irrégularité des pluies et une faiblesse des hauteurs d'eau tombées. Au cours du cycle cultural qui a eu lieu entre le 8 juillet et le 1^{er} octobre 1997, le cumul pluviométrique enregistré a été de 329,2 millimètres contre 437,8 millimètres en médiane pour la période 1966-1995. Les valeurs moyennes de l'humidité relative ont respectivement varié de 84,2 à 100 % pour les maxima et de 36,7 à 70,7 % pour les minima. La moyenne des températures était comprise entre 30,7 et 38,9 °C pour les maxima et entre 21,0 et 25,8 °C pour les minima, et celle du rayonnement global journalier entre 1 124 et 2 683 J/cm². La vitesse moyenne du vent à 10 mètres du sol était de 2,8 m/s et l'évaporation journalière moyenne du bac de classe A de 7,4 millimètres.

Le sol de cette région est de type dior-modal, caractéristique des sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés. Il s'agit de sols de type peu évolués, constitués de dépôts successifs de matériaux sableux et à faible teneur en argile et limons. Le pourcentage d'argile y varie de 7 à 9,3 % et le pH est compris entre 6 et 6,5. En moyenne, l'humidité au point de flétrissement permanent (Pf 4,2) est de 14 mm/m de sol. Elle passe à 134,5 mm/m à la capacité au champ (Pf 3), soit une réserve utile maximale de 120,5 mm/m de sol.

Le dispositif expérimental est en blocs complets randomisés avec trois répétitions. Chaque bloc comportait quatre parcelles de 6 mètres de côté. Deux lignes de cultures centrales étaient réservées au carré de rendement.

Au cours de l'expérimentation, la variété de maïs Synthetic-C a été soumise à quatre régimes hydriques évapotranspiration maximale pendant le cycle (TC) (photo 1), stress en phase végétative (T1) du 27^e au 42^e jour après semis, stress en phase végétative et floraison (T2) et stress en phase floraison (T3) du 50^e au 67^e jour après le semis. Les parcelles stressées ont été recouvertes de bâches en plastique transparent et étanche à l'eau au moment des pluies et pendant la nuit (photo 2).

Les régimes hydriques appliqués ont simulé les formes de sécheresse rencontrées dans 80 % des cas au Sénégal [4]. Pendant les phases sèches, les traitements en régime ETM ont bénéficié d'une irrigation d'appoint.

L'expérimentation a été conduite dans de bonnes conditions agronomiques : labour profond, semences sélectionnées puis traitées au granor, densité optimale de semis (80 x 20 cm), démarrage à trois pieds par poquet, fertilisation (200 kg/ha de 8-18-27) au semis, 100 kg d'urée/ha durant la phase végétative et le début de la phase reproductive, sarclage-binages réguliers, buttage des parcelles, traitements phytosanitaires et protection anti-aviaire.

Méthodes

L'évolution de la teneur en eau du sol a été suivie en appliquant deux méthodes : la méthode gravimétrique et la méthode neutronique. La gravimétrie a été effectuée sur les horizons supérieurs du sol jusqu'à 20 centimètres de profondeur. Les humidités pondérale (Hp) et

Ré

1. mai
role
pas

2. fect
noy

3. clo
upl
19
18

4. po
So
v
30

5. G
C
p
30

6. la
v
37

7. 0
10

8. 10
10
10
10

9. 1
10
7
10



Photo 1 Plantes maintenues à évapotranspiration maximale (ETM) durant le cycle : développement végétatif exubérant (fin du stade végétatif-début de la phase reproductive)

Références

1. Sarré E, Pottier G, Imberton J. Le Sénégal, Senegal : effet des techniques culturales et des conditions hydriques en culture de mil. *Agro Trop* 1981 ; 42 : 85-90.

2. Jensen ME, Loomis RH. Water deficit and its effects on plant growth components. *Agronomy J* 1972 ; 42 : 652-5.

3. Jambou B, Bréchet EN. Propositions for the assessment of the climatic situations of the Sahelian zone. In : *Proceedings of the 1985 World Conference* (Lakota, IRRI, 1985) ; 91-103.

4. Jambou B, Jambou EN. Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agr Meteorol* 1988 ; 42 : 295-305.

5. Rijk D. Développement de la recherche agronomique dans le bassin du fleuve. In : *OMVS éd. Rapport préparé pour l'OMVS et les gouvernements des États membres par la FAO-Rome* (FAO, 1976) ; 167 p.

6. Terrien J, Sinclair TR. Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficits. *Crop Science* 1996 ; 36 : 331-5.

7. Jackson RD. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Res Res* 1981 ; 4 : 1133-6.

8. Charbonnier C. Les mesures de température de surface à partir de l'infrarouge thermique : interprétation en vue de mieux planifier l'irrigation des cultures. *IRHO/CIRAD* ; 1984 ; 41 p.

9. Idso SB. Non water stress baselines : a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agr Meteorol* 1982 ; 27 : 59-70.

10. Vanderschmidt E. Besoins en eau du maïs et de l'arachide à Nioro-du-Rip. Bamboey (SRA, 1989) ; 20 p.



Photo 2 Plantes en conditions de déficit hydrique en phase végétative : ralentissement de la croissance végétative, enroulement et dessèchement foliaire. Au moment de l'application du traitement insecticide, les plants étaient en période d'application du stress.

volumique (Hv) ont été calculées par les formules suivantes :

$$H_p = \left(\frac{PF - PS}{PS - PV} \right) \times 100$$

$$H_v = H_p \times d_a$$

avec PF = poids frais, PS = poids sec d'échantillon de sol, PV = poids vide de la tare et d_a = densité apparente moyenne du sol obtenue à l'aide d'un gammadensimètre (ici : 1,5 g/cm³).

Au milieu de chaque parcelle, un tube d'accès neutronique de 4 mètres de long a été installé. La sonde à neutrons, préalablement étalonnée par gravimétrie en conditions sèches et humides, a permis de déterminer l'humidité volumique dans les couches inférieures du sol (de 20 cm à 4 m de profondeur). L'équation de l'étalonnage de la sonde à neutrons par gravimétrie est la suivante :

$$Y = 0,0471x - 2,94 ; R^2 = 0,96$$

avec n = 66 points pour les horizons supérieurs à 20 centimètres.

Les parcelles élémentaires ont été également buttées au niveau des bordures pour éviter tout ruissellement.

L'évapotranspiration réelle, ou consommation en eau des plantes, pour les différents traitements hydriques a été estimée au pas de temps hebdomadaire à partir de l'équation du bilan hydrique :

$$\Delta R \text{ (mm)} = P + I_{rr} + \Delta \text{stock} \pm R_d \pm D_r$$

où P = cumul pluviométrique en mm enregistré entre deux dates de mesures, I_{rr} = quantité d'eau apportée par irrigation de complément, Δstock = variation du stock d'eau mesurée à deux dates différentes, soit S_1 (ou stock mesuré à la date t_1) - S_2 (ou stock à la date t_2), R_d et D_r , qui constituent respectivement les pertes d'eau par ruissellement et par drainage profond, ont été négligées en raison du buttage des parcelles et de la profondeur des tubes d'accès.

L'ETM, qui correspond aux besoins en eau théorique du maïs, est déterminée par la fonction :

$$ETM = Ev_{bac_{corrigé}} \times K_c - 1$$

avec $Ev_{bac_{corrigé}}$ qui équivaut approximativement à l'évapotranspiration potentielle Penman (ETP), soit $ETP = 0,8 \times Ev_{bac}$ classe A durant l'hivernage [5], et K_c qui traduit les coefficients cultureux de la variété Synthetic-C.

Le taux de satisfaction des besoins en eau des plantes (TSAT) a été déterminé par le rapport ETR/ETM .

La profondeur d'extraction racinaire des plantes (PER) a été déterminée, d'une part, indirectement par confrontation de profils hydriques successifs séparés par une période sans apports d'eau et, d'autre part, par corotage ou 69^e jour après le semis. L'eau disponible dans le sol, ou ASW [6], a été obtenue par l'équation suivante

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

où stock PER est le stock d'eau pour une profondeur d'extraction racinaire donnée, stocks Pf 4,2 et Pf 3 sont respectivement les stocks d'eau au point de flétrissement permanent et à la capacité ou champ du sol pour une même PER.

La température du couvert végétal a été mesurée au moyen d'un radiothermomètre à capteurs infrarouges (Telotemp AG42). Son fonctionnement repose sur le principe selon lequel tout corps émet des rayonnements dont les longueurs d'ondes dépendent de sa température. Cet appareil permet de mesurer à la fois la température du couvert végétal (T_c) de la plante et celle du différentiel de

température ($T_c - T_a$) entre le couvert et l'air (T_a), qui dépendent des capacités transpiratoires des plantes et, donc, de leurs capacités d'absorption de l'eau disponible dans le sol [7, 8].

Parallèlement, une corrélation a été établie entre ($T_c - T_a$) et le déficit de pression de vapeur de l'air (DPV) pour des plantes bien alimentées en eau (figure 2) par une régression linéaire suivant la relation

$$T_c - T_a = a \cdot VFD + b.$$

DPV a été déterminé à l'échelle de la parcelle à partir des températures sèche et humide de l'air mesurées à l'aide d'un psychromètre ventilé

$$DPV (mb) = e_s - e$$

Où e_s est la tension de vapeur d'eau saturante et e la tension réelle de vapeur d'eau ;

$$e_s = 6,11 \exp (17,25 \cdot t / 237,3 + t) \\ e = e_s (th) - \gamma (t - th)$$

où t est la température de l'air, th la température humide et γ constante psychrométrique, est voisine de 0,66 mb/°C.

L'indice de stress hydrique des cultures ou CWSI (crop water stress index) [9], a été ensuite calculé à partir de la relation

$$CWSI = (T_c - T_a - P_2) / (P_1 - P_2)$$

où P_1 est la différence maximale entre ($T_c - T_a$) pour une limite supérieure (plantes stressées) et une limite inférieure ou ligne de base (plantes bien irriguées) et P_2 est la différence ($T_c - T_a$) entre la ligne de base et le point considéré

Références

11. Baldy C, Ruelle P, Fernandes A, et al. Résistance à la sécheresse du sorgho grain en climat méditerranéen. *Sécheresse* 1993 ; 4 : 81-93.
12. Chopart JL, Kone D. Fluctuation de l'alimentation hydrique du maïs en région centre (Côte d'Ivoire). In : *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*. Montpellier : John Libbey Eurotext, 1991 : 39-47.
13. Marone E. Étude 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, Bambey : ISRA 1994 : 64 p.
14. Ammerose D, Clouvel P, Mayeux A. Conduite de l'irrigation dans la région du fleuve Sénégal. Approche physiologique et application à la culture de l'arachide. In : *Atelier base centre Arachide-Cereals : L'arachide cultivée en zones sèches Stratégies et méthodes d'amélioration de l'adaptation à la sécheresse* Bambey : CNBA, 1996 : 11-2.
15. Carr B. Bilan hydrique et productivité du maïs (*Pennisetum glaucum*) cultivé au Sahel sous différents régimes hydriques. Thèse : CERAAS, 1997 : 11 p.

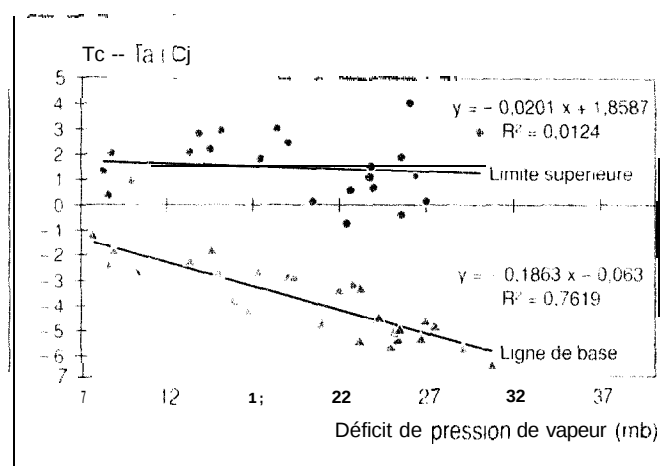


Figure 2. Relation entre le différentiel de température ($T_c - T_a$) et le déficit de pression de vapeur d'eau pour des plantes en évapotranspiration maximale (Δ) et des plantes stressées ($\bullet$) au bout de 10 jours sans apport d'eau

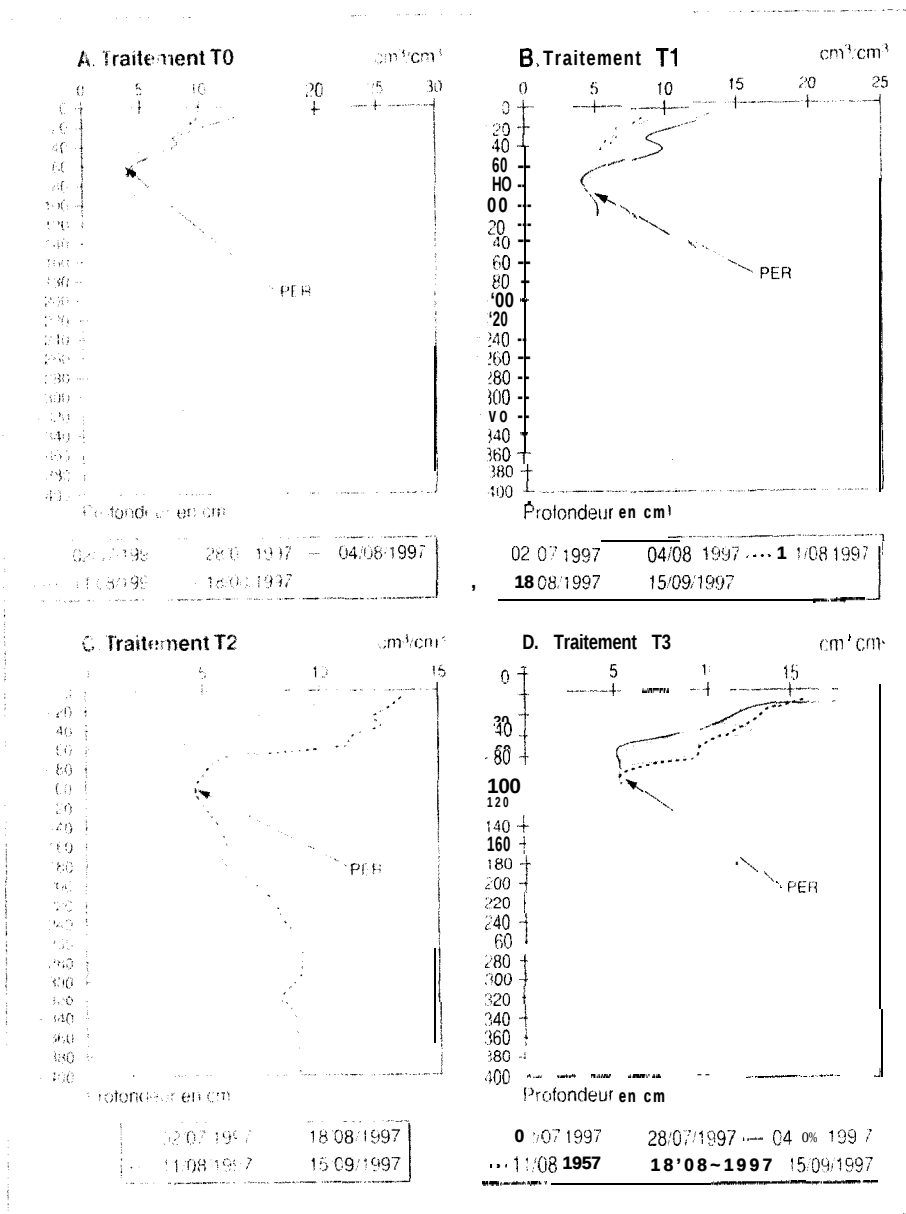


Figure 3. Evolution du profil hydrique du sol sous culture de maïs pour différents régimes hydriques : a) évapotranspiration maximale (ETM) pour le cycle (T0) ; b) stress lors de la phase végétative (T1) ; c) stress lors de la phase végétative et de la floraison (T2) ; d) stress lors de la phase floraison (T3).

Tableau I. Profondeur maximale d'enracinement et vitesse moyenne de croissance racinaire				
Traitements	T0	T1	T2	T3
Profondeur maximale d'enracinement (cm)	60,00	85,00	100,00	85,00
Vitesse moyenne de croissance racinaire (cm/j)	0,86	1,23	1,45	1,23

Tableau II. Consommation en eau et coefficients culturaux actualisés du maïs Synthetic-C

Jours après semis	6	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83
Evapotranspiration (mm)	7,40	8,00	7,40	8,60	8,80	8,10	6,00	5,80	5,90	5,00	6,20
ETRmax (mm)	2,00	3,90	5,00	8,10	10,60	12,00	11,30	9,70	8,40	6,60	5,50
Coefficients culturaux x 1997	0,27	0,48	0,67	0,94	1,20	1,48	1,71	1,53	1,36	1,31	1,09
K _v Vand	0,29	0,48	0,50	0,80	1,09	1,60	1,77	1,80	1,50	1,30	0,80
Moyenne des coefficients culturaux	0,28	0,48	0,59	0,87	1,14	1,54	1,74	1,67	1,43	1,30	0,95

Coefficients culturaux obtenus par Vanderchmitt avec le bac classe A1 10 en 1997 pour la variété Synthetic-C

Enfin, les valeurs du CWSI ont été mises en relation avec celles du rendement en grains.

Résultats et discussion

La dynamique de l'eau et celle de l'enracinement ont été influencées par l'application différentielle du régime hydrique. La teneur en eau dans les parcelles témoins (T0) a été élevée et a varié entre 8 et 25 % pour une profondeur d'extraction racinaire de 60 centimètres (figure 3a-d) soit une croissance racinaire journalière de 0,86 centimètres au 69^e jour après semis. Sur les parcelles stressées T1 et T3, la profondeur d'extraction racinaire a atteint, à la même date, 85 centimètres, soit une croissance de 1,23 cm/j. Pour le traitement T2 stressé en phase végétative et en phase floraison, elle a atteint 100 centimètres au 69^e jour après semis, soit une vitesse de 1,44 cm/j.

Ces résultats sur la réponse du système racinaire au déficit hydrique ont été confirmés par le carottage effectué le même jour. Les profils racinaires établis à la fin du cycle (tableau I) révèlent ainsi une extension verticale plus importante chez les plantes stressées 2 fois (100 cm) que chez celles ayant subi un seul stress (63 cm). Cette extension permet en période de déficit hydrique de mieux explorer les couches les plus profondes du sol pour exploiter l'eau qu'elles contiennent. En revanche, le système racinaire de maïs reste superficiel en condition de confort hydrique (PER de 60 cm pour les T0). Par ailleurs, l'application du stress a entraîné une diminution de l'évapotranspiration réelle (figure 4a) pour les traitements T1 (1,8 mm/j) et T2 (0,8 mm/j) au 3^e jour après semis alors qu'elle est restée très proche de 10 mm/j pour les T0 et T3. Au 62^e jour après semis, l'évapotranspiration réelle journalière de T3 et T2 alors stressés, a atteint la valeur de 1,9 mm/j tandis que celle de T0 et T1 était très proche de 7 mm/j. Les coefficients culturaux actualisés de la variété Synthetic-C (tableau II) ont été obtenus en faisant la moyenne des valeurs de ceux donnés par Vanderchmitt [10] et de ceux déterminés au cours de cette expérimentation.

La figure 4b montre l'évolution du taux de satisfaction des besoins en eau des plantes au cours du cycle. La contrainte hydrique a provoqué une chute brutale de ce taux qui a atteint des faibles valeurs au 41^e jour après semis.

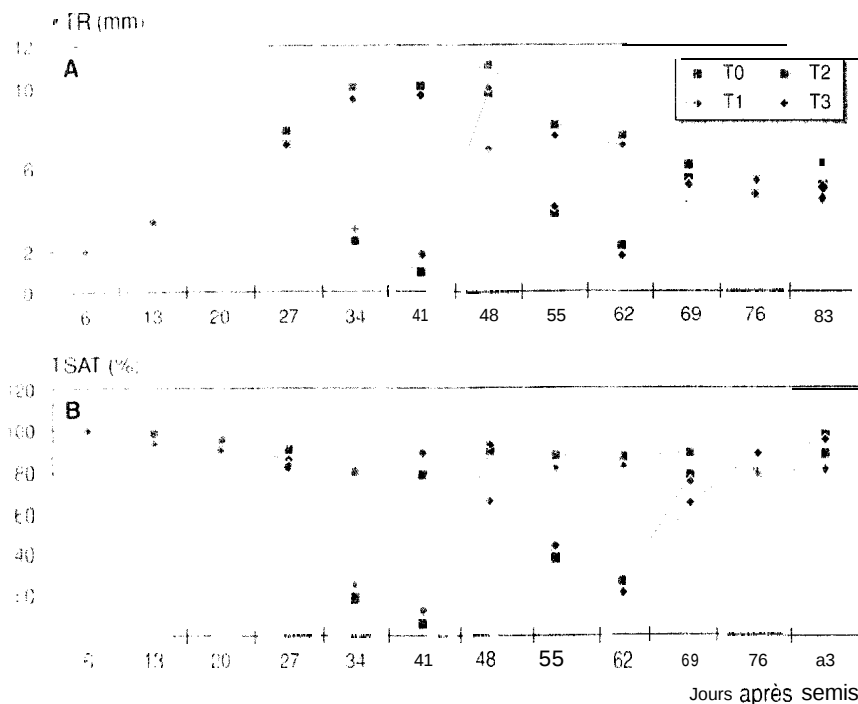


Figure 4. Evolution, pour différents régimes hydriques du maïs : a) de l'évapotranspiration réelle (ETR) ; b) du taux de satisfaction des besoins en eau (ETR/ETM).

Tableau II. Composantes du bilan hydrique et efficacité d'utilisation de l'eau par le maïs

Traitement	Irrigation (mm)	Pluie (mm)	ETR Cycle (mm)	ETR/ETM Cycle (%)	Rendement moyen (t/ha)	Efficacité d'utilisation de l'eau (kg/mm/ha)
T0	445	329	625	73	2,44	6,5
T1	390	239	465	91		5,2
T2	291	192	430	67	1,28	2,9
T3	343	281	553	79	1,65	3,0

(T1 : 12,41 % ; T2 : 5,79 %) et au 62^e (T1 : 25,98 % ; T3 : 21,76 %) correspondant respectivement aux stress des phases végétative et reproductive. Cette diminution de l'évapotranspiration réelle, induite par le déficit hydrique du sol, explique le faible niveau du taux de satisfaction des besoins en eau des plantes stressées. Ces valeurs (inférieures à 30 %) traduisent des niveaux de stress très sévères pour le maïs.

L'irrigation de complément des témoins (T0) pour l'ensemble du cycle a accéléré la consommation en eau et a permis d'obtenir des niveaux d'alimentation en eau optimaux (taux de satisfaction des besoins en eau des plantes de l'ordre de 90 %). Durant l'application du deuxième stress sur les T2 et T3 en phase de floraison, le taux de satisfaction moyen a été de 34,06 % pour T2 et de 46,11 % pour T3. Suivant les traitements, une variation importante de l'évapotranspiration réelle (moyenne pour l'ensemble du cycle a été

notée : les traitements T0 et T3 ont consommé le plus d'eau, respectivement 624,98 et 552,99 millimètres (ce qui correspond approximativement aux besoins en eau cumulés du maïs), alors que T1 et T2 en ont consommé le moins, respectivement 464,96 et 429,92 millimètres, du fait de l'intensité (T2) et de la phase d'application du stress (T1). Ces rendements en grains rapportés aux consommations en eau (ETR) ont permis de calculer l'efficacité de l'utilisation de l'eau consommée par le maïs. Sur l'ensemble des traitements, T0 se distingue par la meilleure efficacité : 6,5 kg/ha/mm (tableau III). Le traitement T1, stressé en phase végétative, a eu un régime hydrique plus efficace (5,2 kg/ha/mm) que T2 (2,9 kg/ha/mm) et T3 (3 kg/ha/mm), stressés en floraison. Pour T1, la récupération qui a fait suite à la phase de déficit hydrique a été bonne et la réhydratation durant la phase floraison-

remplissage des grains a sensiblement amélioré son efficacité. Il est apparu que le stress en période de floraison a eu un effet dépressif sur l'efficacité d'utilisation de l'eau pour les traitements T2 et T3. Ces résultats montrent que la production en grains de la variété Synthetic-C est fortement liée aux conditions d'alimentation hydrique pendant la floraison.

L'évolution comparée (figures 5a et 5b) de l'eau disponible dans le sol et de l'indice de stress hydrique montre l'étroite dépendance entre ces deux paramètres. Des valeurs élevées du CWSI correspondent à de faibles niveaux de disponibilité en eau dans le sol. C'est le cas des traitements T2 et T3 stressés en phase floraison, où la contrainte hydrique lorsqu'elle est associée à la forte demande climatique accroît la température du couvert végétal. L'augmentation de l'indice de stress hydrique traduit l'incapacité de la plante à maintenir sa transpiration foliaire en relation avec la limitation de l'absorption hydrique racinaire et/ou la fermeture des stomates. Une augmentation rapide de cet indice est étroitement associée à une baisse de l'eau disponible, de l'ordre de 40 à 50 %.

En outre, une baisse du endement en grains du maïs est associée à une augmentation de l'indice de stress hydrique pendant la floraison. À ce moment du cycle végétatif, des indices de stress hydrique intérieurs à 0,27 donnent des niveaux de rendement en grains appréciables pour la variété Synthetic-C (figure 6). Des rendements maximaux, supérieurs à 4 t/ha sont obtenus pour des valeurs de l'indice de stress hydrique proches de 0. Ces résultats confirment que le rendement final en grains dépend étroitement des conditions hydriques de la plante durant la période de la floraison.

Ce travail montre ainsi l'intérêt du suivi de la température du couvert et de l'eau du sol pour étudier la réponse au stress hydrique, la gestion de l'alimentation en eau et le comportement agronomique des cultures en zones sèches [11]. L'indice de stress hydrique et le taux de satisfaction des besoins en eau sont deux paramètres importants caractérisant l'état hydrique des plantes. Une éduction de l'eau disponible dans le sol de 40 % environ et une valeur de l'indice de stress hydrique de l'ordre de 0,27 correspondent à un débit de dé-

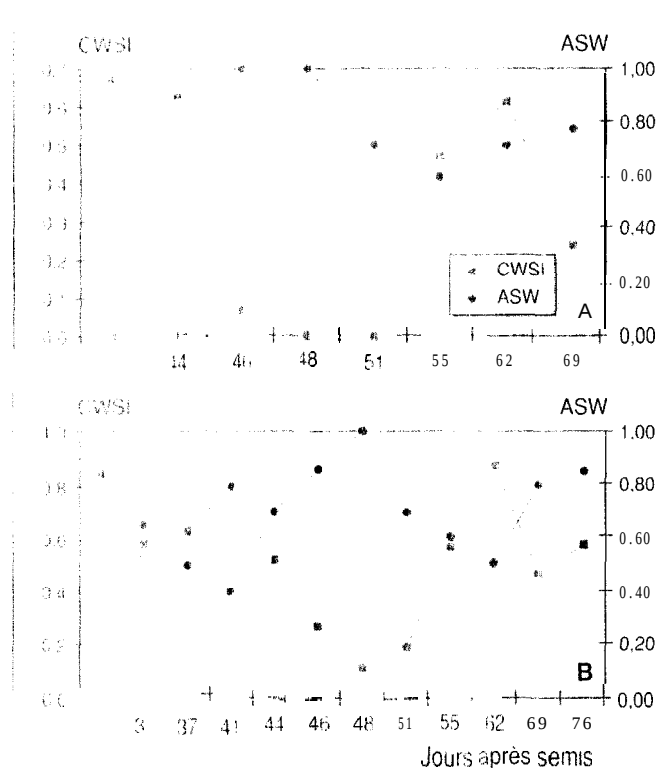


Figure 5. Evolution comparée de l'eau disponible dans le sol (ASW) et de l'indice de stress hydrique des cultures : a) stress lors de la phase de floraison, b) stress lors des phases végétative et de la floraison

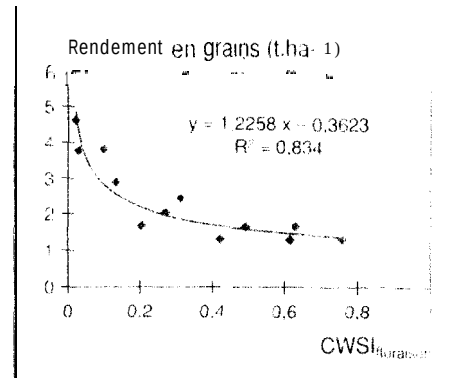


Figure 6. Relation entre l'indice de stress hydrique des cultures à la floraison ($CWSI_{\text{floraison}}$) et le rendement en grains du maïs

est hydrique modéré chez le maïs, avec des valeurs de taux de satisfaction des besoins en eau correspondant inférieures à 75 % environ [12]. Ces valeurs peuvent être retenues comme indice seuil pour déclencher précocement l'irrigation. Indiquons ici que pour l'arachide, l'eau disponible dans le sol correspondante est de 50 à 60 % [13] et l'indice de stress hydrique de 0,3 [14] ; pour le mil, l'eau disponible dans le sol est de l'ordre de 70 à 60 % [15]. Les résultats obtenus ici pour le maïs indiquent sa plus grande sensibilité au stress hydrique que les autres espèces tropicales.

Conclusion

L'étude du bilan hydrique du système sol-plante-atmosphère a permis de mettre en évidence la grande sensibilité de la production de maïs au rationnement hydrique durant la période de la floraison. Par ailleurs, en couplant l'eau disponible dans le sol, le taux de satisfaction des besoins en eau des plantes, l'indice de stress hydrique et le rendement en grains, on a pu retenir, pour la variété Synthet-C, une valeur de l'indice de stress hydrique de l'ordre de 0,27 comme seuil pour déclencher l'irrigation.

Summary

In Senegal, maize (*Zea mays* L.) is cultivated in different agroclimatic zones. Under rainfed conditions, south of the 600-700 mm isohyet, maize cultivation is limited by water deficit periods during the rainy season. Under irrigated conditions, maize is mainly grown in the Senegal River valley. In this context, assessment of the response of maize to drought and water resources management are essential for optimizing maize production. In the present study, water stress was applied at different maize phenological stages under field conditions. The study was aimed at comparing different indicators of soil and crop water stress level that could be used as tools for scheduling irrigation, and at determining stages in the maize growth cycle when water deficit is most crucial. The results highlighted that a 40-50% decrease in ASW, corresponding to a 75% TSAT, induced a rapid increase in CWSI. Grain yields of >4 t/ha were obtained when the CWSI level at flowering was <0.27. By integrating these parameters, a CWSI of 0.27 was calculated as the threshold level for early irrigation scheduling concerning the Synthetic-C maize variety.

Résumé

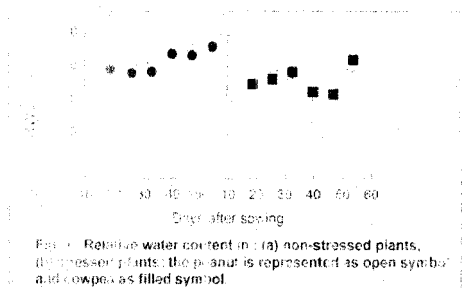
Au Sénégal, le maïs (*zeu Mays* L.) est cultivé sous divers environnements agroclimatiques. En système pluvial, cette culture, qui est pratiquée au sud de l'isohyète 600-700 mm, est limitée par l'apparition de périodes de déficit hydrique au cours de la saison des pluies. En culture irriguée, elle est pratiquée dans la vallée du fleuve Sénégal. Dans ce contexte, l'étude de la réponse à la sécheresse des cultures et/ou la gestion optimale de, ressources en eau deviennent une donnée importante pour améliorer la production agricole. Des travaux ont été conduits au champ en conditions de déficit hydrique à différents stades phénologiques du maïs. Le but de cet essai était de comparer différents paramètres révélateurs du niveau de stress hydrique du sol et de la plante tels que l'eau disponible dans le sol, le taux de satisfaction des besoins en eau des plantes et l'indice de stress hydrique des cultures. Les résultats obtenus ont montré qu'une réduction de l'eau disponible dans le sol de 40 à 50 %, correspondant à un taux de satisfaction des besoins en eau de l'ordre 75 %, entraînait une hausse rapide de l'indice de stress hydrique. Des rendements en grains supérieurs à 4 t/ha ont été obtenus pour des valeurs de l'indice de stress hydrique à la floraison inférieur à 0,27. En couplant ces différents paramètres, on a pu déterminer, pour la variété Synthet-C, une valeur seuil d'indice de stress hydrique de 0,27 pour déclencher précocement l'irrigation.

Stomatal Behavior, Osmotic Adjustment and Water Status of Cowpea and Peanut at Low Soil Moisture Status

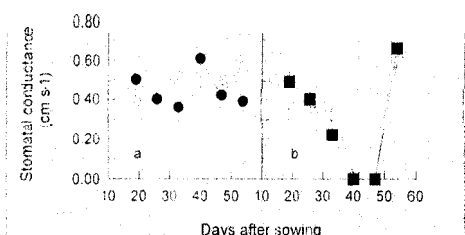
The responses of three varieties, each of cowpea and peanut (two most important leguminous species cultivated south of the Sahara), were compared to explain the frequently observed higher leaf relative water content (RWC) in cowpea than peanut during drought. RWC is one important parameter used in determining plant water status during drought.

Plants were grown in 20 litre PVC pots in controlled conditions (maximum temperature was $40.6 \pm 2.0^\circ\text{C}$ in the day, and $23.5 \pm 1.4^\circ\text{C}$ in the night; relative humidity ranged from $49.8 \pm 4.1\%$ in the day to $70.0 \pm 3.5\%$ in the night). Natural light was not supplemented (maximal irradiance was $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ at mid-day). The experiment was a randomized complete block (2 species X 3 varieties X 2 irrigation schedules, stressed and irrigated) with 5 replications. Irrigation was suspended for stressed plants between 32 and 50 days after sowing, and resumed when gravimetric moisture was between 84.1% to 87.4% less than the control (0.76 to 0.80 g g^{-1} soil). Measurements of RWC, stomatal conductance (by porometry) and total nitrogen (by the Khedjal method) were taken at intervals, whereas osmotic adjustment was measured on day 47 (by the method of Livingston and De Jong, 1988).

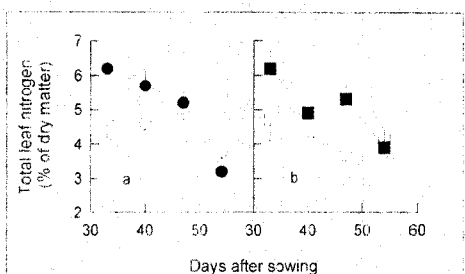
Generally, drought caused significant reductions in RWC (Fig. 1). However, whereas the RWC in cowpea did not drop below 82.1% during drought, RWC in peanut dropped to 60.9%. A high temporary wilting point (TWP) was observed for cowpea (78% RWC), below which the leaves entered an irreversible permanent wilting status (PWS). Peanut leaves entered PWS below 55% RWC. Leaves that had not passed TWP recovered on re-irrigation.



Stomatal closure was more rapid in cowpea than in peanut during stress. The prompt response through stomatal closure (fig. 2) in cowpea enabled the plants to check stomatal transpiration as soil moisture deficit persisted. Complete stomatal closure was delayed in peanut. Such delays, although beneficial in respect of CO_2 assimilation, were at the risk of continued water loss through partially open stomata.



Higher amounts of leaf total nitrogen were maintained in stressed cowpea, whereas there were decreases in the quantity of total nitrogen in stressed peanut (fig 3). Nitrogenous compounds, such as amino acids, could be playing a role in osmotic adjustment (OA) in cowpea.



The plants that had experienced water stress had significantly higher leaf RWC than the non-stressed ones when exposed to concentrations of salt solution. At more negative osmotic potential the leaf tissue of cowpea retained higher moisture than that of peanut (fig. 4). Osmotic adjustment could be helping cowpea to retain more leaf moisture during water stress. Plants with higher OA had higher RWC during drought. Osmotic adjustment reduces the impact of stress experienced by cells.

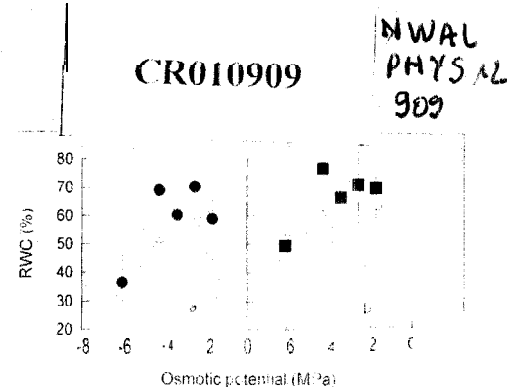


Table 1. Relative pod yield in cowpea and peanut (g g⁻¹ shoot weight) after a short period of water stress.

	stressed	not stressed
cowpea	0.9	1
peanut	1.1	1

Although cowpea had higher RWC, promptly closed its stomata, and also had a better osmotic adjustment than peanut, relative pod yield (g g⁻¹ shoot weight) in cowpea was not higher than peanut (Table 1). Rapid stomatal closure may have interfered with CO_2 assimilation, especially during reproductive growth in cowpea. However, prompt stomatal response and osmotic adjustments appear to be responsible, among other factors, for the higher RWC in cowpea than in peanut. On resumption of irrigation peanut recovered its lush growth more rapidly than cowpea. In conclusion therefore, cowpea and peanut appear to be exhibiting two different but efficient strategies in response to drought, since relative yield was not affected. Cowpea utilizes a conservative strategy in comparison to peanut which has an evasive one.

Acknowledgements

This study was conducted at Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS), Bambey, Senegal and was supported with funds from EEC, contract number TS2A 0101M (CD).

Reference

Livingston, N.J. and E. De Jong (1988). *Agron. J.* 80: 815-818.



Centre d'étude régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse

ISRA/CNRA — BP 59

Bambey — Sénégal

Tel./Fax : (221) 73 61 97

CORAF
Conférence des responsables de la recherche agronomique africains
BP 120 — Dakar — Sénégal
Tel : (221) 25 96 18
Fax : (221) 25 55 69
Téléc : 25 81 04 04

Institut sénégalais de recherches agricoles
Route des Hydrocarbures
Bel Air — BP 3120
Dakar — Sénégal
Tel : (221) 32 24 30 / 32 24 31
Fax : (221) 32 24 27

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CIRAD
BP 67
34310 Montpellier
France
Tel : (33) 4 67 31 80 00
Fax : (33) 4 67 31 80 05

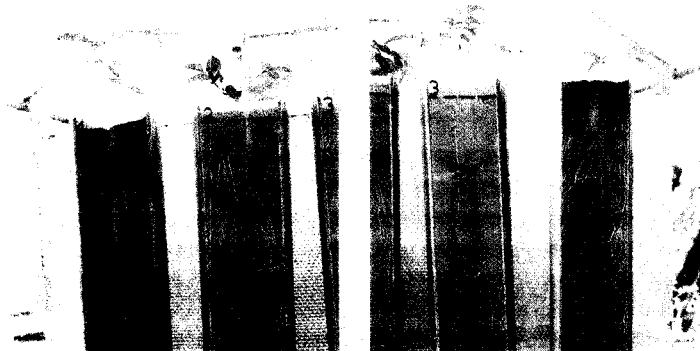
Root Behavior in Cowpea during Water Stress

NWAL
PHYS12
1361

CR001361

ABSTRACT

The growth and distribution of roots of two cowpea varieties (IT84 and B89-504) were studied in drying and moist soil columns to determine their root distribution characteristics.



The plants were grown in 1 m opaque PVC tubes (plate 1a and 1b), as previously described by Annerose (1990). The experiment was conducted in a glasshouse (maximum temperature was $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ day and $19.0 \pm 2.5^\circ\text{C}$ night; maximum relative humidity was $72.0 \pm 1.0\%$ and minimum was $10.0 \pm 3.0\%$; and natural daylight). *In situ* root elongation and distribution, as apparent on the transparent window, were studied from commencement of soil drying to the end of the experiment on day 31 after sowing. Observations from the transparent window were assumed to be representative of the entire soil column. The results are presented as pooled means of the varieties.

The primary root in drying soil column was significantly ($p < 0.01$) longer than that in irrigated soil. The root in drying soil was growing at the rate of 2.2 cm day^{-1} , and attained a length of $63.5 \pm 6.4\text{ cm}$, whereas that in irrigated soil was growing at the rate of 1.25 cm day^{-1} and was $41.5 \pm 4.9\text{ cm}$ by day 31 (fig. 1).

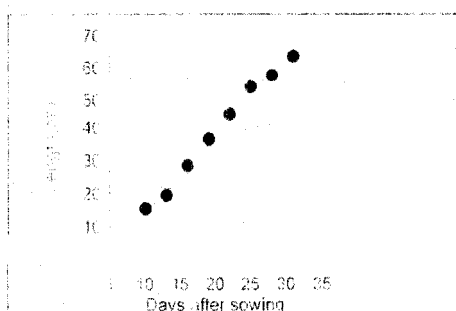


Fig. 1: Length of the longest root in stressed (filled symbol) and non-stressed (open symbol) cowpea

The density of rooting in the upper segment of the soil column (0 to 40 cm) was significantly ($P < 0.01$) higher in moist soil than in drying soil

column at the later part of the experiment (fig. 2a). As the soil columns graduated into deeper profiles (40 to 80 cm), the density of rooting in well watered plants decreased remarkably, and increased for plants in drying soil (fig. 2b). The higher root density in the deeper segments for plants in drying soil was an indication of root re-orientation to the distribution of water in the soil column, which maximized root contact with the unexplored and more moist parts of 1 ht. soil. Moist soil has a higher water potential and also offers low mechanical resistance to root expansion.

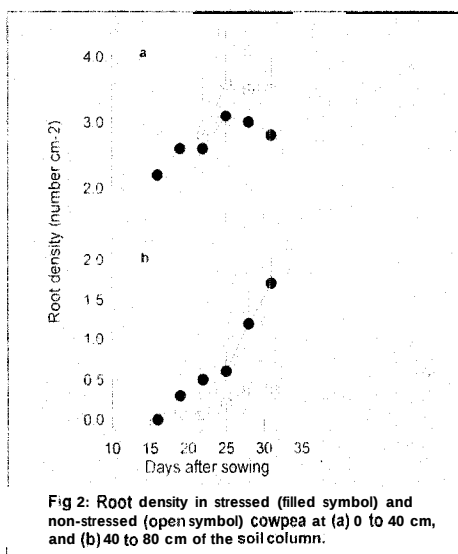


Fig. 2: Root density in stressed (filled symbol) and non-stressed (open symbol) cowpea at (a) 0 to 40 cm, and (b) 40 to 80 cm of the soil column.

There was a significantly ($p < 0.01$) lower moisture content in the upper (0 to 40 cm) than in the lower (40 to 80 cm) segments of the drying soil columns (fig. 3) at the end of the experiment. Most of the water in the upper segment (0 to 40 cm) of drying soil had been depleted by day 31. With root proliferation into the 40 to 80 cm segment of drying soil column, the moisture content of this region began to decline, indicating water extraction from the hitherto unexploited soil.

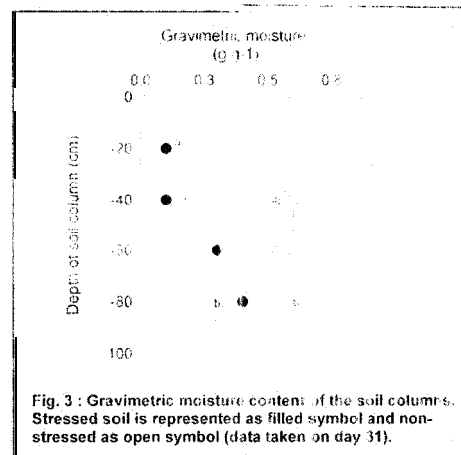


Fig. 3: Gravimetric moisture contents of the soil columns. Stressed soil is represented as filled symbol and non-stressed as open symbol (data taken on day 31).

Table 1. The effects of soil drying on leaf water potential, leaf area and biomass in cowpea (data taken on day 31).

	stressed	nonstressed
Water potential (MPa)	3.10 ± 0.8	-1.95 ± 0.5
Shoot dry weight (g)	0.79 ± 0.2	1.55 ± 0.5
Leaf area (cm²)	122.5 ± 3.7	187.5 ± 10.2
Root volume (cm³)	1.7 ± 0.2	5.0 ± 0.1
Root dry weight (g)	0.49 ± 0.1	0.43 ± 0.1

Significant ($P < 0.01$) differences between treatments

In spite of the deeper proliferation of roots in drying soil columns and depletion of moisture at such depth, the leaves had significantly ($P < 0.01$) lower water potential, shoot weight and leaf area than those of well irrigated columns (Table 1). Water uptake by the deep roots of plants in drying soil was not sufficient to offset the detrimental effects of drought on the above soil biomass. The lower dry weight and volume of roots in drying soil than in moist soil was not, however, significant. Soil drying did not appear to have provoked the growth of extra roots since final root mass in drying soil was similar to that in irrigated conditions. There was rather a change in the orientation of the roots along the gradients of water distribution in the column, with a loss of root material at the upper and gain in the lower segments as the soil dried.

Acknowledgements

This study was conducted at Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS), Bambey, Senegal and was supported with funds from EEC grant number ST2A-0101M/CH).

Reference

Annerose, D.J.M. (1990). These, Université Paris VII, 282 pages.



Centre d'étude régional pour
l'amélioration de l'adaptation
à la sécheresse

ISRA/CNRA -- BP 59
Bambey -- Sénégal
Tel./Fax : (221) 73 61 97

Conférence
des responsables
de la recherche
agronomique
africains

CORAF

BP 3120 -- Dakar -- Sénégal
Tel. : (221) 25 96 18
Fax : (221) 25 55 69
Telex : 51284CORAF

Institut
sénégalais
de recherches
agricoles

Route des Hydrocarbures
Sél Air -- BP 3120
Dakar -- Senegal
Tel. : (221) 32 24 30 / 32 24 31
Fax : (221) 32 24 27

Centre de
coopération
internationale
en recherche
agronomique pour
le développement

IRAD-CA
BP 5035
34032 Montpellier
France
Tel. : (33) 67 61 58 00
Fax : (33) 67 61 56 05