

CHAPITRE XVII

RÔLE DU SYSTÈME RACINAIRE DANS LA RÉSISTANCE À LA SÉCHERESSE CHEZ LE MIL : ANALYSE DE LA RHIZOGENÈSE POST-FLORALE

S. DAOUDA OUSMANE, R. EMMANUEL et P. MARINI
Institut des Radio-Isotopes, Université Abdoul Moumouni de Niamey.
BP 10727 Niamey ; Niger

I - INTRODUCTION

Face au déficit hydrique, la plante réagit par des mécanismes morpho-physiologiques d'évitement ou de tolérance à la sécheresse (Levitt, 1980 ; Turner, 1986). L'un des plus importants mécanismes est l'extension du système racinaire (Passioura, 1983 ; Clarke *et al.*, 1984 ; Jones *et al.*, 1984 ; Muchow *et al.*, 1986). Il est généralement admis que l'utilisation de la réserve en eau du sol est étroitement liée à la morphologie (profondeur et densité) et à l'activité (conductivité hydraulique notamment) du système racinaire (Gregory *et al.*, 1984 ; Ludlow *et al.*, 1988 ; Gregory, 1989). Il est évident que le système racinaire le plus profond met à la disposition du végétal le plus grand volume de sol à exploiter. Jordan (1983) montre chez le sorgho, qu'un enracinement profond peut augmenter jusqu'à 20 % le rendement au cours des années sèches. L'amélioration, en même temps que la sécurisation de la production agricole, pourraient donc passer par l'identification de cultivars à enracinement profond. Un effet génotypique sur la profondeur et la forme de l'enracinement a en effet été démontré chez différentes espèces cultivées: Shriniwas *et al.* (1974) ainsi que Batcho *et al.* (1990) sur le mil; Hurd (1974) sur le blé ; Taylor *et al.* (1978) sur le niébé ; Mathews *et al.* (1988) sur l'arachide ; Jordan *et al.* (1979) sur le sorgho. Mais se pose la question des relations entre un enracinement profond et le développement des parties aériennes d'une part (concurrence ou synergie entre les différents organes ?) et d'autre part la dynamique d'utilisation de l'eau du sol chez le mil. Turner et Nicholas (1987) obtiennent une plus grande biomasse à la floraison et un rendement en grain supérieur chez le génotype qui a montré la plus grande vitesse de croissance racinaire en phase d'installation. Tous ces résultats démontrent la relation entre certaines caractéristiques du système racinaire et le rendement final, en général dans les conditions normales d'alimentation hydrique.

Mais la question est de savoir, quel est, dans les conditions de déficit hydrique, le rôle exact du système racinaire. Qu'il soit profond ou superficiel, quelle est son évolution ? Y a-t-il néogenèse de racines, et si oui évidemment, quel est le coût en assimilats de cette extension et quelle est l'efficacité du processus en terme de rendement final, notamment en fin de cycle où le système racinaire est supposé être en fin de croissance et le remplissage de grain en pleine activité ?

Ce travail aborde l'étude du comportement du système racinaire du mil face à un déficit hydrique de fin de cycle et l'effet sur le rendement qui en résulte. La démarche expérimentale adoptée est une approche comparative de plusieurs cultivars de mil, *a priori* différents dans leur performances en condition de sécheresse. Elle a pour but d'identifier les principaux caractères morphologiques et physiologiques d'adaptation à la sécheresse, dans leur réponse intégrée au champ. Un essai en rhizotron a permis de caractériser la mise en place du système racinaire, de la levée au début de la montaison (40 jours après le semis). Plusieurs essais en plein champ ont porté sur la période de fin de cycle (floraison-récolte). Les premiers résultats obtenus sont présentés ici.

II - MATERIEL ET METHODES

A - Essai en rhizotron

L'essai a été réalisé en rhizotron au CNRA de Bambey au Sénégal, durant l'hivernage 1990. Le rhizotron est constitué d'un tube PVC de 16 cm de diamètre et de 100 cm de hauteur. Il est rempli de terre fine d'un sol ferrugineux tropical dont la capacité de rétention est estimée de 6 à 12 mm par tranche de 10 cm de sol. Un film plastique noir recouvre le rhizotron et permet de créer les conditions d'obscurité aux racines. Le dispositif expérimental comporte :

- 4 variétés de mil : ICMVIS86330 (IC30), ICMVIS85327 (IC27) et HKP, choisies à cause de leurs comportements opposés face à un stress hydrique terminal et une forme sauvage ;
- 3 conditions hydriques notées de C1 à C3 : une alimentation en eau sans limitation, avec une dose quotidienne de 200cm³ par rhizotron (C1) ; une alimentation hydrique déficitaire qui consiste, à partir d'un sol porté à la capacité au champ, à ne plus arroser (C2) et un scénario où le profil initial est à la capacité au champ dans sa partie inférieure (50 à 100 cm), avec une humidité plus faible dans la partie supérieure (C3). Le nombre de répétitions est de 6. L'avancement du front racinaire est observé et mesuré à l'aide d'un mètre à travers le plexiglas, deux fois par semaine sur chaque rhizotron.

B - Essai en plein champ

Ces essais ont été conduits en 1990 et 1992 à Niamey au Niger. La température journalière varie entre 26°C et 41°C au cours de la saison de l'essai. L'humidité relative, faible en moyenne peut descendre jusqu'à 15 % en milieu de journée. L'évapotranspiration potentielle est estimée en moyenne entre 6 et 8 mm j⁻¹.

La parcelle d'essai repose sur un sol ferrugineux tropical peu lessivé, développé sur un matériau sableux, profond et perméable, dont la capacité de rétention en eau varie entre 70 et 80 mm dans le premier mètre de sol (Daouda *et al.*, 1991). Le dispositif expérimental est un essai factoriel à deux facteurs (un facteur variétal à 4 niveaux, un facteur hydrique à 2 niveaux) à 6 répétitions non randomisées. En 1992 deux des quatre variétés ont été retenues et le nombre de répétitions porté à 10. Pour des raisons de limitation en moyens et main-d'oeuvre, 4 blocs seulement ont été considérés pour la caractérisation du système racinaire.

Le matériel végétal est le même que celui décrit précédemment pour l'essai en rhizotron. L'alimentation hydrique comporte un témoin irrigué, sans limitation jusqu'à la récolte et le stressé qui subit un arrêt de l'irrigation à partir de la floraison. En 1990 l'irrigation a été rétablie après 15 jours de stress hydrique.

Les quatre variétés sont semées en poquets (démariés à trois brins), avec une densité de 10000 poquets par hectare. Un apport modéré d'engrais en solution (45 unités d'azote et 22,5 unités de phosphore) a été effectué en deux fois : au démariage et à la montaison.

La biomasse racinaire a été estimée par la méthode de carottage, avec un carottier de 770 cm³ de volume utile. La caractérisation du système racinaire a été faite à la floraison et à la récolte en 1990 et suivie de façon dynamique à raison d'une fois par semaine en 1992.

1) Matière sèche aérienne

Les données ont été collectées dans le but d'analyser la croissance et le développement de poquets soumis à un déficit hydrique post-floral. Les mesures ont été réalisées à 11 dates de 47 à 83 JAE (jours après émergence). A chaque date, sur chacun des 10 blocs-répétition des 4 combinaisons cultivars/traitement, la partie aérienne d'un poquet a été prélevée puis triée (tiges, feuilles vertes, feuilles sénescentes, épis) en distinguant talles et brins maîtres, pour permettre des comptages (tiges, épis) et la pesée de la matière sèche des différents organes (séchage à 100°C pendant 48 heures). Après séchage, les épis ont été battus afin de déterminer le nombre et le poids sec des grains. La masse de matière sèche est estimée par la moyenne des 10 répétitions pour chaque traitement et pour chaque date d'observation.

Les résultats globaux sur la matière sèche aérienne sont présentés par ailleurs (Do et Winkel communication personnelle). On rappellera ici les principales conclusions permettant de discuter les résultats sur les racines.

2) Matière sèche racinaire

Les données collectées entre 47 et 79 JAE à raison d'un prélèvement par semaine, ont permis de déterminer la biomasse totale du système racinaire en même temps que sa distribution verticale et latérale dans le sol. Un objectif particulier était de vérifier une éventuelle reprise de la croissance racinaire chez les plantes soumises au déficit hydrique.

A chaque date, sur quatre blocs-répétition de chaque combinaison cultivar/traitement, le système racinaire d'un poquet a été échantillonné par carottage le long de quatre axes verticaux situés, le premier sous l'axe du poquet, et les trois autres à 20, 40 et 70 cm de l'axe du poquet dans trois directions différentes. Les carottes ont été prélevées de 10 en 10 cm jusqu'à 1 m de profondeur, puis de 20 en 20 cm jusqu'à 2 m de profondeur. Les racines ont été extraites par lavage sur un tamis, puis mises à sécher 48 heures à 80°C avant d'être pesées. Avant les carottages, un "monolithe" de 30 cm de diamètre et de 30 cm de profondeur était prélevé à la base du poquet. Le prélèvement de ce cylindre, représentant le volume de sol le plus densément colonisé par les racines, permet d'évaluer directement (sans biais lié à l'échantillonnage) entre 60 et 75 % de la biomasse racinaire totale (données de l'hivernage 1991, non publiées).

L'estimation de la biomasse de racine totale par poquet est obtenue selon une méthode d'intégration mise au point à l'IRI (Santucci *et al.* 1991) et le logiciel VOYONS (Thiéry, 1991).

III - RESULTATS

A - Essai en rhizotron

La vitesse d'avancement du front racinaire est estimée par la différence du niveau du front entre deux observations, rapportée au temps écoulé en jour. Pour chaque traitement et pour chaque période, la vitesse d'avancement est calculée par la moyenne des 6 répétitions. La vitesse de colonisation verticale en phase d'installation (0 à 40 jours après le semis) est assimilée à la moyenne des vitesses sur les périodes intermédiaires. Le tableau 1 dresse les valeurs obtenues pour les 4 cultivars et pour les 3 traitements hydriques.

Tableau 1

Vitesses moyennes d'avancement du front racinaire entre la germination et la montaison (cm j^{-1}). 3 conditions hydriques sont testées ; une alimentation normale (C1) et deux alimentations déficitaires (C2 et C3).

	IC30		IC27		HKP		SAUVAGE	
	(1-3)	(4-5)	(1-3)	(4-5)	(1-3)	(4-5)	(1-3)	(4-5)
C1	2,0	1,2	2,5	1,8	2,2	1,6	1,7	0,8
C2	2,1	4,5	2,1	4,8	2,6	4,0	2,5	2,7
C3	4,0	2,0	3,6	2,2	4,4	1,0	3,0	2,8

On remarque que la vitesse d'extension verticale est nettement plus faible chez les témoins irrigués ($1,3$ à $2,1 \text{ cm j}^{-1}$ contre $2,6$ à $3,5 \text{ cm j}^{-1}$). En phase d'installation, le déficit hydrique accélère l'extension verticale du système racinaire chez le mil. En moyenne sur l'ensemble de la période, il n'apparaît pas de différence significative entre les deux traitements où l'alimentation en eau est restreinte (C2 et C3). En revanche, si on distingue les 3 premières semaines de croissance de la période qui suit (tableau 2), on constate que jusqu'à la 3^{ème} semaine, en C2 (contrainte hydrique moyenne), la vitesse d'enracinement est comparable à celle du témoin irrigué (C1) et nettement inférieure à celle du traitement C3 (contrainte hydrique sévère). La situation s'inverse au cours de la période suivante (semaines 4 et 5), avec des vitesses d'enracinement deux fois plus fortes en C2 qu'en C3. Dans ce même temps, l'avancement du front racinaire est ralenti chez le témoin irrigué.

Tableau 2

Vitesses moyennes d'avancement du front racinaire entre la germination et la montaison (cm j^{-1}), pour les 3 conditions hydriques. Deux périodes de croissance sont indépendamment considérées : les 3 premières semaines (1-3) et la période qui suit (4-5).

	IC30		IC27		HKP		SAUVAGE	
	(1-3)	(4-5)	(1-3)	(4-5)	(1-3)	(4-5)	(1-3)	(4-5)
C1	2,0	1,2	2,5	1,8	2,2	1,6	1,7	0,8
C2	2,1	4,5	2,1	4,8	2,6	4,0	2,5	2,7
C3	4,0	2,0	3,6	2,2	4,4	1,0	3,0	2,8

Face à un déficit hydrique en phase d'installation, la capacité d'extension en profondeur du système racinaire reste donc la même, que le déficit soit précoce (C3) ou tardif (C2). Elle ne diffère pas non plus entre les 3 variétés cultivées. Pour la forme sauvage, l'extension verticale du front racinaire sous l'effet du déficit hydrique est moins forte que chez les cultivars et également moins sensible au type de déficit (précoce ou tardif).

B - ESSAI EN PLEIN CHAMP

1) Matière sèche aérienne

• Au niveau de la matière sèche totale

Globalement les deux cultivars montrent une évolution de la biomasse aérienne totale comparable jusqu'à la floraison à 55 JAE. Puis le cultivar HKP se distingue par un accroissement de biomasse nettement supérieur sur les témoins irrigués. Cette différence est mise en évidence sur le traitement stressé.

Le stress hydrique post-floral se caractérise par une baisse de la croissance globale. Cette baisse de croissance s'explique par un blocage des talles chez le traitement stressé, alors que les brins maîtres se comportent pratiquement comme chez le témoin.

• Au niveau des tiges et gaines

Il y a également un blocage de la croissance du poids des tiges et gaines sous l'effet du stress hydrique. Et mieux, on observe une décroissance du poids qui affecte d'abord les talles pour ensuite s'étendre, mais dans une moindre mesure, aux brins maîtres. Il résulte en définitive une perte de biomasse des talles et un maintien de la croissance des brins maîtres, comme si une mobilisation des réserves des talles compensait un déficit de croissance des brins maîtres en phase de remplissage des grains.

• Au niveau des épis

La croissance des épis des brins maîtres est maintenue malgré le stress hydrique. Elle est en revanche bloquée quelques jours seulement après le début du stress. La différence de performances entre les deux cultivars se situe au niveau des brins maîtres.

• En conclusion

Le stress hydrique post-floral entraîne un ralentissement global de la croissance des parties aériennes, qui s'explique par la perte de poids des talles affectant particulièrement les tiges. La croissance des épis des brins maîtres se maintient et suit une évolution normale même en cas de stress hydrique. Les talles sont les plus influencées par les effets du stress hydrique ; ceux-ci semblent intervenir dans la première semaine de contrainte hydrique.

Le cultivar HKP, qui montre un potentiel de tallage plus important, est évidemment plus affecté globalement par le stress hydrique.

2) Matière sèche racinaire

Les résultats obtenus ont permis de visualiser les courbes d'évolution de biomasse de racine soit en fonction du temps (figure 1) soit en fonction de la profondeur (figures 2 à 5).

Pour le cultivar HKP, la masse totale de racines augmente progressivement jusqu'au 69 JAE, alors qu'elle demeure pratiquement stable depuis la floraison (55 JAE) pour le cultivar IC30 (figure 1). En revanche, il n'y a pas de différence significative entre traitements pour la production globale de matière sèche racinaire. Ainsi, l'évolution en terme de poids total de racines par poquet est différente selon le cultivar, mais n'est pas influencée par le stress hydrique post-floral.

Les figures 2 et 3 sont les profils de matière sèche racinaire cumulée entre 0 et 200 cm du sol, dans le cas des témoins irrigués à la floraison (55 JAE) et 2 semaines après (69 JAE). On constate l'écart net entre, d'une part, le profil à 55 et à 69 JAE, et d'autre part, entre les deux cultivars IC30 et HKP à 69 JAE. A la floraison il n'y a pas de différence sur la masse de racine totale entre les deux cultivars. Mais par la suite le système racinaire montre une croissance supérieure chez le cultivar HKP. Contrairement à la plupart des résultats antérieurs, on montre que le système racinaire du mil évolue après la floraison et que cette évolution dépend du cultivar.

Les figures 4 et 5 montrent les profils de masse de racine cumulée dans le cas du traitement stressé. Les profils sont également différents entre les deux dates d'observation, avec un accroissement net après la floraison notamment pour le cultivar HKP.

Le tableau 3 donne les écarts de biomasse entre 55 et 69 JAE. L'accroissement de la masse des racines après la floraison est soumis à un test statistique pour vérifier si l'écart correspond réellement à une évolution du système racinaire.

Tableau 3
Evolution de la biomasse racinaire 2 semaines après la floraison pour l'année 1992
(g m⁻²)

Type		55 JAE	69 JAE	Pr (%)
Irrigué	IC30	77,8 ± 15,6	77,3 ± 22,1	(76,5)
	HKP	61,0 ± 21,4	109,7 ± 16,1	(2,5)
Stressé	IC30	49,9 ± 4,2	73,9 ± 12,8	(8,5)
	HKP	68,3 ± 5,3	121,2 ± 24,5	(0,7)

Les chiffres entre parenthèses donnent la probabilité d'égalité des moyennes, issue du test de l'hypothèse d'homogénéité, à l'aide du logiciel VOYONS de JM. Thiéry sur les bases théoriques exposées par Scherrer (1984). On constate en particulier que l'accroissement de biomasse de racine en condition de stress hydrique est très hautement significatif (au seuil de 1 %) pour le cultivar HKP et significatif pour IC30. L'accroissement de masse de racine est bien réel. Il se produit même en conditions d'alimentation normale en eau chez HKP, alors qu'il n'apparaît que sous stress hydrique pour le cultivar IC30. La croissance post-florale du système racinaire est un phénomène naturel, plus développé chez certains cultivars (HKP) que chez d'autres (IC30). Il est stimulé et renforcé par le stress hydrique.

L'analyse de la variation de la masse totale des racines exprimée en % par rapport à la floraison est présentée dans le tableau 4. Pour le traitement stressé, l'évolution se caractérise par une augmentation globale de 48 % et 78 % respectivement pour IC30 et HKP, avec une forte prolifération en profondeur (100-200 cm), où la densité de racine est en moyenne multipliée par 3,5 pour IC30 et 5,2 pour HKP. Dans le cas du témoin irrigué, l'évolution du système racinaire montre globalement une augmentation dans l'horizon de surface, faible pour IC30 (14 %) mais forte pour HKP (112 %), parallèlement à une diminution en profondeur allant jusqu'à 50 % pour HKP. Ainsi, en condition d'alimentation hydrique non limitante et sous irrigation de complément, il y a une augmentation superficielle de la masse de racine et dès qu'il y a un stress hydrique, il se produit une extension en profondeur du système racinaire. Le cultivar HKP montre une meilleure aptitude à ce point de vue.

Tableau 4
Rhizogenèse post-florale mesurée par l'accroissement relatif de biomasse racinaire par rapport à la floraison (%).

Profondeur	irrigué		stressé	
	IC30	HKP	IC30	HKP
0-50	14	112	30	62
50-100	- 51	13	214	79
100-200	- 30	-53	251	421
0-200	- 0,5	80	48	78

IV - CONCLUSIONS

Un certain nombre de points méritent d'être soulignés, à l'issue du suivi de l'évolution de la matière sèche aérienne après la floraison chez le mil :

- la tendance végétative supérieure du cultivar HKP ; à noter que ceci est un caractère surtout observé chez les formes sauvages ;
- la performance (exprimée en poids sec d'épis ou de grains) supérieure du cultivar IC30 à tallage limité ;
- le stress hydrique post-floral affectant surtout ou presque exclusivement les talles, les brins maîtres maintiennent leur développement comparable à celui du témoin irrigué jusqu'à la récolte, et ce, au détriment des talles qui se désintègrent progressivement.

Concernant les racines, le stress hydrique entraîne une extension en profondeur du système racinaire, où la densité est multipliée par 3 ou par 4 par rapport à la floraison. Le cultivar HKP est celui qui montre la meilleure aptitude à étendre son système racinaire.

Une question reste cependant posée, à la fin de ces observations: quelle est la destination de la biomasse perdue par les talles et les tiges des brins maîtres ; vers les épis des brins maîtres ; vers les organes souterrains notamment les racines ; ou bien vers d'autres processus métaboliques ? En tout état de cause, le cultivar HKP, dont les talles et les tiges ont perdu le maximum de poids pendant la période de stress hydrique, est aussi celui qui a le plus étendu son système racinaire en profondeur.

En condition stressée, il y a prolifération des racines en profondeur (100-200 cm) en même temps qu'il y a perte de poids des talles et maintien de la croissance des brins maîtres et de leurs épis. Ainsi, tout se passe comme si les assimilats des talles et les réserves de leurs tiges étaient détournés vers l'extension du système racinaire en profondeur (via les brins maîtres) et/ou vers le remplissage des épis des brins maîtres. L'analyse des croissances relatives des différents organes après la floraison et le bilan de masse par poquet permettra d'étayer cette hypothèse.

BIBLIOGRAPHIE

- ANONYME, 1990. Etude agrophysiologique des mécanismes de résistance du mil à la sécheresse. Rapport Annuel 1990, Institut des Radio-Isotopes, Université de Niamey, 14 pp.
- BATCHO (E.), DAOUDA (O.S.), DO (F.), ANNEROSE (D.J.M.), KHALFAOUI (J.L.), FOFANA (A.), LAFFRAY (D.) et LOUGUET (P.) 1990. Etude de la croissance racinaire de six cultivars de mil (*Pennisetum americanum* L.). Revue du Réseau pour l'Amélioration de la Productivité Agricole en Milieu Aride. 2 : 51-65.
- BIDINGER (FR.), MAHALAKSHMI (V.) and RAO (G.D.P.), 1987. Assessment of drought resistance in pearl millet. II. Estimation of genotype response to stress. Aust. J. Agric. Res. 38 : 49-59.
- CHOPART (J.L.), 1980. Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 148 pp.
- CLARKE (J.M.) and TOWNLEY-SMITH (T.F.), 1984. Screening and selection techniques for improving drought resistance. In : Crop Breeding, a Contemporary Basis. Vose, P.B. and Blixt, S.G. (eds). Pergamon Press, Oxford, UK. : 137-162.
- DANCETTE (C.), 1983. Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zones soudano-sahéliennes. Agron. Trop. 38, (4) : 281-293.
- DIAS DA SILVA (J.C.), NUNES DE PINHO (J.L.), LAFFRAY (D.) et LOUGUET (P.), 1990. Effet d'une contrainte hydrique contrôlée sur divers paramètres hydriques et physiologiques de cultivars de mil et sorgho sensibles et résistants à la sécheresse. Rev. Rés. Amélior. Product. Agri. Milieu Aride 2 : 79-92.
- GREGORY (P.J.), 1989. The role of root characteristics in moderating the effects of drought. In Drought Resistance in Cereals. BAKER, F.W.J. (ed), Wallingford : 141-150.
- GREGORY (P.J.), SHEPHERD (K.D.) and COOPER (P.J.M.), 1984. Effects of fertilizer on root growth and water use of barley in Northern Syria. J. Agri. Sc. 103 : 429-438.
- HURD (E.A.), 1974. Phenotype and drought tolerance in wheat. Agric. Meteor. 14 : 39-55.
- JONES, (J.W.) and ZUR (B.), 1984. Simulation of possible adaptative mechanisms in crops subjected to water stress. Irrigation Science 5 : 251-264.
- JORDAN (W.R.), MILLER (F.R.) and MORRIS (D.E.), 1979. Genetic variation in root and shoot growth of sorghum in hydroponics. Crop Science, 19 : 468-472.

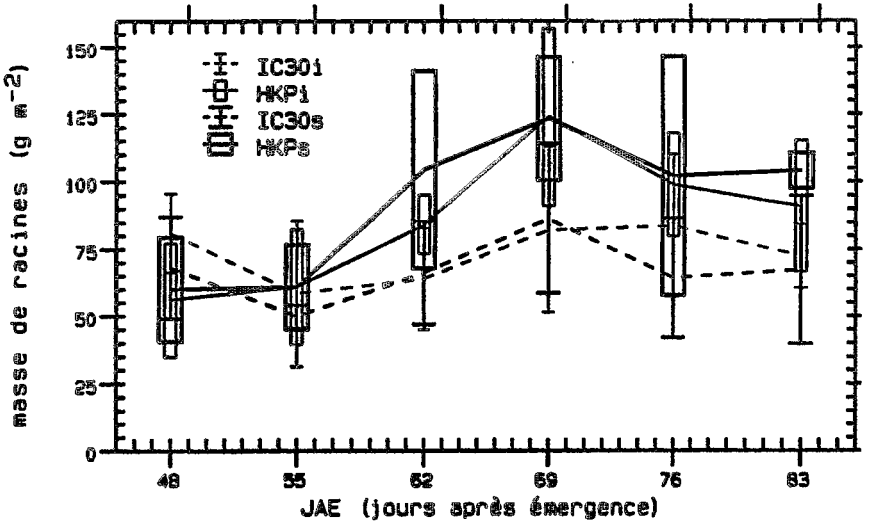
- JORDAN (W.R.), DOUGAS (W.A.) and SHOUSE (P.J.), 1983. Strategies and crop improvement for drought-prone regions. *In Plant Production and Management Under Drought Conditions*. Stone, J.F. and Willis, W. (eds). Elseviers, Amsterdam, Netherlands. 251-264
- LEVITT (J.), 1980. Drought avoidance. *In Responses of Plants to Environmental Stress*. Levitt, J. (ed). *Physiological Ecology*. II : 93-128.
- LUDLOW (M.M.) and MUCHOW (R.C.), 1988. Critical evaluation of the possibilities for modifying crops for high production per unit of precipitation. *In Drought Research Priorities for the Dryland Tropics*. Bidinger, F.R. and Johansen, C. (eds). ICRISAT, Patancheru, India. pp 179-211.
- MATHEWS (R.B.), HARRIS (D.), NAGESWARA RAO (R.C.), WILLIAMS (J.S.) and WADIA (K.D.R.), 1988. The physiological basis for yield differences between four genotypes of groundnut (*Arachis hypogea*) in response to drought. I. Dry matter production and water use. *Exp. Agri.* 24 : 191-202.
- MORGAN (J.M.), 1988. The use of coleoptile response to water stress to differentiate wheat genotypes for osmoregulation, growth and yield. *Ann. Bot.* 62 : 193-198.
- MUCHOW (R.C.), and SINCLAIR (T.R.), 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. II. Field and model analyses. *Field Crops Res.* 15 : 143-156.
- PASSIOURA (J.P.), 1982. The role of root system characteristics in drought resistance of crop plants. *In Drought Resistance of Crops with Special Emphasis in Rice*. International Rice Research Institute (ed), Los Banos, Laguna, Phillipines. 71-82.
- PASSIOURA (J.P.), 1983. Roots and drought resistance. *In Plant Production and Management Under Drought Conditions*. Stone, J.F. and Willis, W. (eds). Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 265-280.
- DAOUDA OUSMANE (S.), SICOT (M.) et MARINI (P.), 1990. Caractérisation de la diversité hydrodynamique d'un sol ferrugineux tropical, différencié sur sable dunaire en milieu soudano-sahélien. SIVAKUMAR, S.V.K., WALLACE, J.S., RENARD, C. et GIROUX, C. (eds), 1991. Soil Water Balance in the Soudano-sahélien Zone (Proc. Int. Workshop, Niamey, Niger, february 1991) 199 : 209-216.
- SANTUCCI (P.), THIÉRY (J.M.), DAOUDA OUSMANE (S.), DO (F.) et MARINI (P.), 1992. Contribution à l'étude des profils racinaires du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) et méthode de calcul de la masse racinaire sous le poquet. *Rev. Rés. Amélior. Prod. Agr. Milieu Aride*, 4 : 25-34.
- SHRINIWAS and SUBBIAH (B.V.), 1976. Root studies of some Bajra hybrids (*Pennisetum typhoides* Stapf). *J. Nuc. Agri. Bio.* 5 : 15-16
- SIBAND (P.), 1983. Essai d'analyse du fonctionnement du mil en zone sahélienne. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 302 p.
- SIVAKUMAR (S.V.K.), 1986. Programme Ouest Africain de l'ICRISAT. Rapport Annuel, Centre Sahélien de l'ICRISAT, 1986, Niamey, Niger.: 47-53.

TAYLOR (H.M.), BURNETT (E.) and BOOTH (G.D.), 1978. Toproot elongation rate of soybeans. *Zeitschrift fur Acker und Pflanzenbau* 146 : 33-39.

THIÉRY (J.M.), 1991. VOYONS, Programme de Simulation Conversationnelle en Physico-chimie et Agronomie. *In Logiciels pour la chimie*, 292-293, ANTONOT (N.), COME (G) M. , GUIDON (J.) , SOULIÉ (E.), (eds), Soc. Fr. Chimie (Paris) et Agence Nat. Logiciel (CNRS, Nancy), ISBN 2-903532-05-2.

TURNER (N.C.), 1986. Crop water deficit : a decade of progress. *Adv. Agron.* 39 : 1-51.

TURNER (N.C.), and NICHOLAS (M.E.), 1987. Drought resistance of wheat for light textural soils in a Mediterranean climate. *In Drought Tolerance in Winter Cereals.* Srivastava, J.P., Porceddu, E., Acevedo, E. and Varma, S. (eds), Jones Wiley, New York : 203-216.



Racines IC30 et HKP (irriguées ou stressées)

Figure 1

Evolution de la matière aérienne entre la floraison (55 vase) et la récolte. Le traitement hydrique stressé (s) est comparé au témoin irrigué (i) pour les deux cultivars IC30 et HKP (les barres d'erreur représentent les écarts types sur les moyennes).

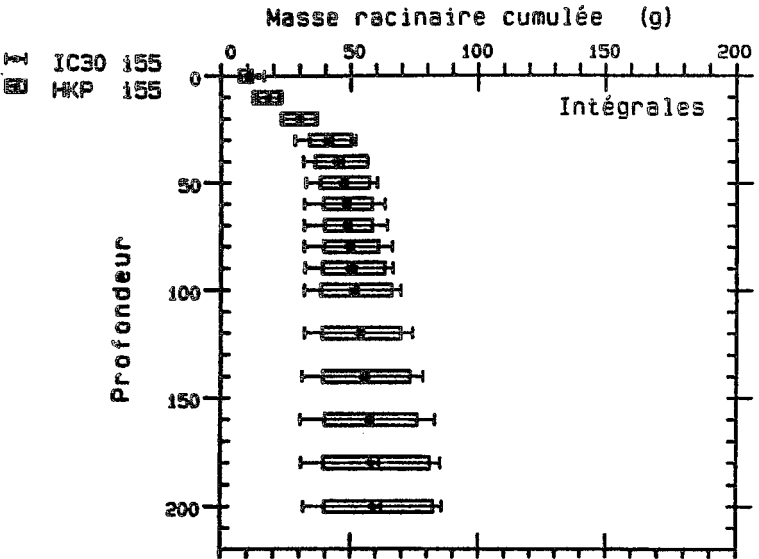


Figure 2

Profils cumulés de matière sèche racinaire à la floraison dans le cas du témoin irrigué (les barres d'erreur représentent les écarts types sur les moyennes)

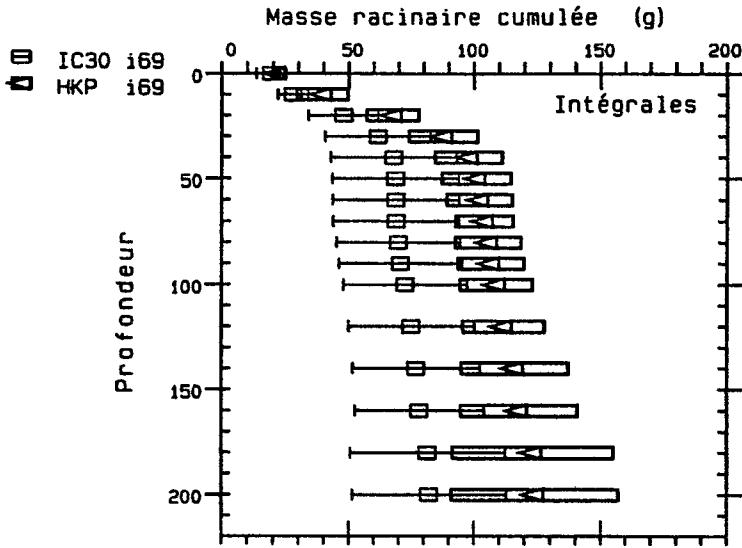


Figure 3

Profils cumulés de matière sèche racinaire deux semaines après la floraison, dans le cas des témoins irrigués IC30 et HKP

(les barres d'erreur représentent les écart types sur les moyennes)

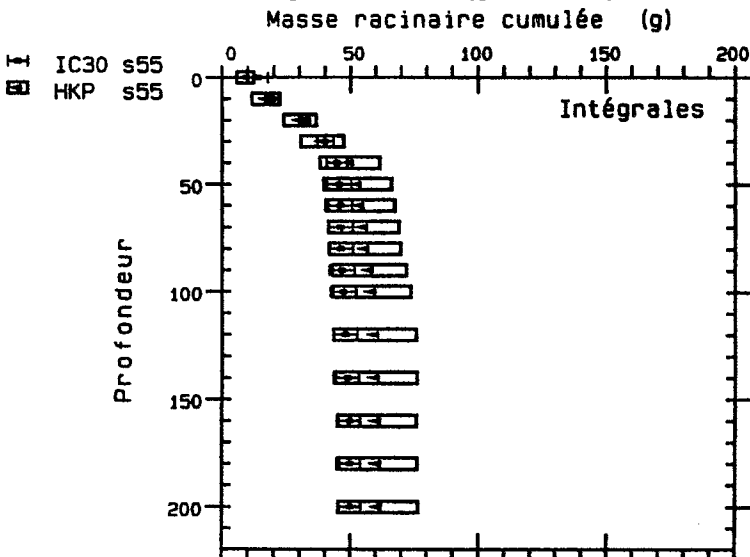


Figure 4

Profils cumulés de matière sèche racinaire à la floraison dans le cas des traitements stressés IC30 et HKP

(les barres d'erreur représentent les écart types sur les moyennes)

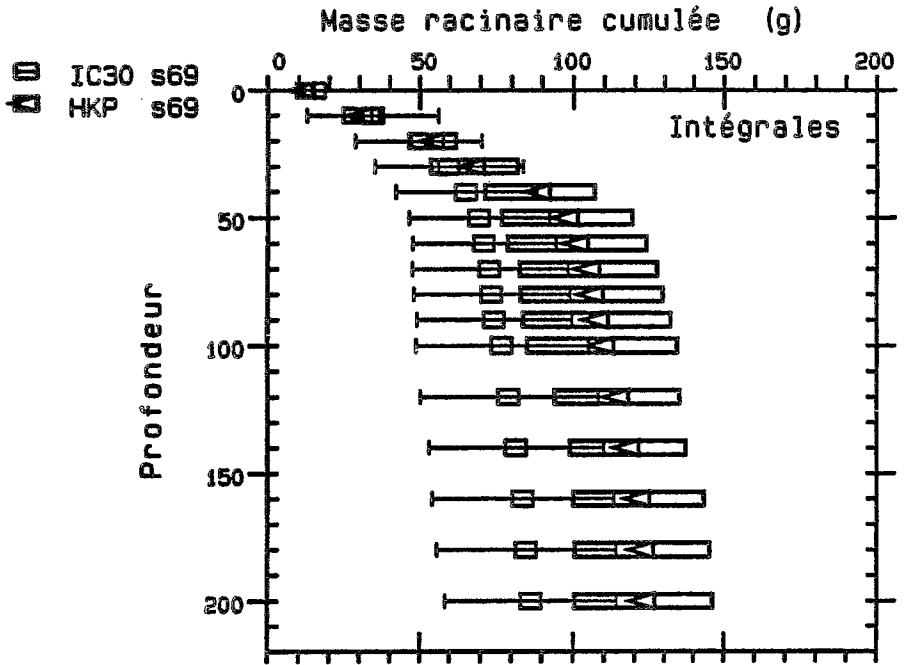


Figure 5

Profils cumulés de matière sèche racinaire deux semaines après la floraison, pour les traitements stressés IC30 et HKP (les barres d'erreur représentent les écarts types sur les moyennes).