



№ INV
66 NI 2436
M1076PHYB/002
OUS

**ROLE DU SYSTEME RACINAIRE DANS LA RESISTANCE DU MIL
A LA SECHERESSE.**

**MEMOIRE DE FIN DE PREMIERE ANNEE
DE FORMATION A LA RECHERCHE**

**Sani DAOUDA OUSMANE
Institut des Radio-Isotopes. Université de Niamey.
BP 10727 Niamey Niger.**

Octobre 1991



Ce mémoire termine la première année d'une formation à la recherche qui s'insère dans le cadre d'un contrat "formation-insertion" de l'ORSTOM et fait l'objet d'une convention entre l'ORSTOM et l'Université de Niamey (République du Niger). Le but final de cette formation est la présentation d'une thèse de doctorat dont le thème est: "Etude de l'alimentation hydrique et minérale du mil en milieu contraignant".

Durant cette première année d'investigation deux opérations ont été conduites:

- l'étude de la réaction du système racinaire du mil face à un déficit hydrique post-floral, réalisée en plein champ pendant la contre-saison froide 1988-1989 et la contre-saison chaude 1990;
- l'étude de la réaction du système racinaire du mil face à un déficit hydrique de début de cycle, menée en rhizotron au CERAAS de Bambey au Sénégal durant l'hivernage 1990.

Les principaux résultats obtenus sont présentés dans ce document.

DEFINITION DU PROBLEME

Le déficit hydrique apparaît dans une plante quand ses pertes en eau (transpiration) excèdent ses possibilités d'absorption racinaire. Cette contrainte hydrique se répercute rapidement sur les activités métaboliques de la plante et, à plus long terme, sur sa morphologie.

Le déficit hydrique peut intervenir de manière transitoire, pendant les heures chaudes de la journée ou bien être plus durable s'il résulte de conditions climatiques défavorables.

Dans la zone tropicale semi-aride, deux périodes de fortes probabilités de sécheresse menacent plus particulièrement les cultures annuelles: la première au moment de l'installation de la culture, la seconde à partir de la floraison (Sivakumar, 1986). La seconde situation (appelée indifféremment sécheresse terminale, ou de fin de cycle, ou post-florale) est assurément la plus dangereuse. Elle survient en effet alors que les resemis ne sont plus possibles et affecte la fécondation, ce qui peut remettre en cause le rendement en grain escompté.

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 de ces 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), 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 la question se pose 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. Mais dans le cas d'un stress hydrique terminal, qui intervient à la floraison, au moment même où on semble admettre que la croissance du système racinaire prend fin, quel sera le type d'enracinement à la floraison le

plus favorable, pour une meilleure utilisation de l'eau du sol et le maintien du rendement ? Un enracinement étendu et dense, à grande capacité et rapidité d'exploitation des réserves du sol, ou bien un système racinaire plus ou moins suspendu, laissant généralement de l'eau disponible résiduelle à maturité ?

Quel est le rôle de cette structure du système racinaire à la floraison pour le comportement ultérieur du mil concernant l'exploitation de la réserve en eau du sol, le maintien de la morphologie et des capacités photosynthétiques, le remplissage des grains, etc. pendant une sécheresse terminale ?

Qu'il s'agisse d'un système racinaire étendu et dense ou d'un système racinaire suspendu, quelle serait la réaction face à un déficit hydrique terminal ? Une extension (néogenèse) en profondeur ou latérale ? Comment alors différencier ce phénomène morphologique du système racinaire, d'une simple entrée en activité de racines déjà présentes dans le sol ? Cette distinction est importante car l'incidence des deux processus sur l'utilisation des ressources carbonées de la plante et donc sur le rendement est différente.

La réponse à ces questions permettra de préciser, pour les conditions de cultures étudiées (sol, régime hydrique), les stratégies d'utilisation de l'eau du sol développées par les différents cultivars de mil ainsi que les réactions morpho-physiologiques qui leur sont associées. Pour ce faire il faut:

1/ caractériser la structure initiale de la plante à la floraison à travers la répartition de la biomasse entre les différents organes (racines, tiges, feuilles, épis);

2/ déterminer les liens existant entre cette structure à la floraison et la croissance racinaire en phase d'installation de la culture; son rôle dans l'exploitation post-florale de la réserve en eau du sol, et le maintien du rendement, en période de déficit hydrique;

3/ déterminer l'évolution morphologique du système racinaire au cours d'une période de stress hydrique post-floral;

4/ parallèlement, caractériser l'activité du système racinaire et sa dynamique par le suivi de l'extraction de l'eau du sol et l'étude de sa répartition dans le profil durant la période de déficit hydrique;

5/ relier ce fonctionnement racinaire à la croissance et à l'état hydrique de la partie aérienne pour en préciser les conséquences sur l'élaboration du rendement.

La méthodologie adoptée repose sur une approche comparative du fonctionnement racinaire de cultivars réputés plus ou moins résistants à la sécheresse, soumis à des régimes hydriques naturels (pluvial) ou contrôlés (contre-saison, rhizotron), avec témoins irrigués.

I. ESSAI EN RHIZOTRON

Résumé:

La vitesse de colonisation verticale du système racinaire est étudiée en rhizotron pour six cultivars de mil (*Pennisetum glaucum*) et pour trois traitements hydriques en début de cycle, du semis jusqu'à la montaison (40 jours). Il est mis en évidence une relation entre la vitesse d'enracinement et l'état hydrique du sol d'une part, et une dispersion variétale de la morphologie du système racinaire en condition d'alimentation hydrique normale d'autre part.

INTRODUCTION

Cette étude fait suite à des essais de criblage de variétés de mil pour la résistance à la sécheresse (Bidinger *et al.* 1988) et d'analyse des mécanismes morphophysiologiques de cette résistance (Do *et al.* 1989, Anonyme 1990, Da Silva *et al.* 1989), sous l'effet d'un stress hydrique en fin de cycle notamment. Elle a pour but de déterminer le comportement de six cultivars de mil face à un stress hydrique appliqué en début de cycle (40 premiers jours après le semis). Dans ces conditions, la survie du jeune plant dépend de son aptitude à coloniser rapidement le sol et à disposer d'une réserve hydrique potentielle importante.

L'essai a été réalisé durant l'hivernage 1990 à Bambey au Sénégal en collaboration avec plusieurs chercheurs: E. Batcho, D. Laffray, P. Louguet du laboratoire de physiologie végétale et d'écophysiologie végétale appliquée de l'Université Paris XII, D.J. Annerose, J.L. Khalfaoui et A. Fofana du CERAAS/CNRA de Bambey, F. Do et O.S. Daouda de l'IRI.

On ne traitera dans ce rapport, que de la vitesse de colonisation du sol par les racines des différents cultivars, en raison de l'indisponibilité des données relatives aux autres paramètres racinaires (biomasse et longueur totales).

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Le climat

L'essai est réalisé en fin d'hivernage, d'août à septembre 1990. De façon générale, le climat est comparable à celui des environs de Niamey: vents et rayonnements forts, températures élevées aboutissant à une demande évaporative intense, supérieure à 5mm/jour (Dancette, 1976). Le degré d'hygrométrie est faible sauf justement en hivernage où il peut atteindre des valeurs supérieures à 90%.

1.2. Le sol

Les rhizotrons utilisés pour l'essai sont remplis avec de la terre fine récoltée à partir d'horizons de surface du sol décrit ci-après. Il s'agit d'un sol ferrugineux tropical profond, comparable à celui de Niamey mais plus riche en argile. La densité apparente en sol non cultivé est de l'ordre de 1.6 donnant une porosité totale faible (40%). L'eau utile correspondant à la différence entre l'humidité à la capacité au champ et le point de flétrissement varie entre 6 et 12 mm par tranche de 10 cm de sol. La capacité d'échange cationique est faible et le complexe absorbant faiblement saturé. L'azote total est de 0.02 à 0.1% en surface avec une nette diminution en profondeur. Le C/N (entre 8 et 15) indique une matière organique labile.

1.2. Dispositif expérimental

Il comporte 6 variétés, 3 traitements et 6 répétitions. Soit en tout un ensemble de 108 rhizotrons entièrement randomisés.

1.2.1. Le rhizotron

Il a été décrit par le CERAAS (1990). Il est composé de tubes en PVC de 100 cm de hauteur et 16 cm de diamètre ayant une face plane transparente en plexiglas. Le tube est disposé en position inclinée de 45° sur un châssis métallique du côté de la face transparente. Sous l'effet du géotropisme, les racines viennent s'appliquer en partie contre le plexiglas permettant ainsi leur observation.

Le remplissage du rhizotron se fait avec de la terre fine qui, dans notre cas a été mélangée à 4 g d'engrais NPK 10 21 21 correspondant à 40 kg pour 10000 poquets, dose plutôt modérée. La terre est tassée de manière à reconstituer au mieux la situation réelle au champ (densité de 1.45 à 1.65). Une couche horizontale de gravillons de 5 cm d'épaisseur est créée au milieu du rhizotron de façon à rompre les flux capillaires et à tester la capacité des racines à franchir un "obstacle".

Le rhizotron est recouvert d'un film plastique noir qui crée les conditions d'obscurité habituelles au milieu racinaire. Un autre film dans la partie supérieure empêche l'entrée de la pluie, mais limite aussi l'évaporation directe du sol.

1.2.2. Le matériel végétal

Il comprend 5 variétés cultivées de cycle moyen (90 jours) et une forme sauvage :

- deux cultivars améliorés par l'ICRISAT: ICMVIS85327 (IC27) et ICMVIS86330 (IC30). Ils ont montré des comportements opposés face à un stress hydrique terminal;

- une variété sélectionnée par l'IRAT et vulgarisée par l'INRAN, HKP. Elle est considérée comme résistante;

- une forme sauvage (*sp violaceum*), fournie par les généticiens de l'ORSTOM;

- deux cultivars fournis par le service semencier du CNRA/ISRA de Bambey: SOUNA3 et IBV8004.

Les quatre premières variétés sont celles sur lesquelles travaillent en condition de stress hydrique post-floral, les équipes de l'IRI/ORSTOM à Niamey, des laboratoires de physiologie végétale des Universités Paris VII et Paris XII et l'équipe associée CEA/CIRAD/ORSTOM au Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache.

1.2.3. L'alimentation hydrique

Trois conditions hydriques sont testées. Elles sont analogues à des situations réelles qui se présentent dans le sol en début d'hivernage:

- le traitement hydrique 1, appelé C1. Il s'agit d'une alimentation en eau sans limitation, qui maintient le profil hydrique du sol à la capacité au champ pendant toute la durée de l'essai. L'arrosage est quotidien à la dose 200 cm^3 par poquet (rhizotron);
- le traitement hydrique 2, appelé C2. C'est une alimentation hydrique déficitaire qui consiste à partir d'un sol porté à la capacité au champ et ne plus arroser. C'est le cas assez fréquent d'une première pluie très abondante suivie d'une longue période de sécheresse;
- le traitement hydrique 3, appelé C3. C'est un autre 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. Ce cas peut se rencontrer soit lors d'un semis tardif ou d'un resemis, soit en présence de nappe perchée ou peu profonde.

1.3. Méthodes de mesure

1.3.1. Le suivi de l'avancement du front racinaire

On mesure la racine la plus longue, observée à travers le plexiglas, deux fois par semaine sur chaque rhizotron. La vitesse d'avancement du front racinaire est calculée par simple différence.

1.3.2. La colonisation du sol

Une note entre 1 et 5 permet d'apprécier visuellement le niveau de colonisation du sol par les racines à travers la face transparente du rhizotron.

1.3.3. Les autres paramètres mesurés

Plusieurs paramètres de caractérisation du système racinaire ont également été mesurés à la fin de l'essai, quarante jours après le semis (Batcho *et al.* 1991). Il s'agit de:

- la distribution des racines. A la fin de l'essai le rhizotron est découpé en tranches de 20 cm, puis la longueur totale et la masse des racines sont déterminées pour chaque tranche. Le nombre de racines est aussi déterminé pour l'horizon 0-20 cm;
- la racine la plus longue. Sur la moitié des répétitions, le système racinaire est dégagé intact et la racine la plus longue est mesurée;
- le volume racinaire. Il est déterminé en plongeant l'ensemble des racines dans une éprouvette graduée contenant de l'eau. Le volume d'eau déplacée donne le volume des racines.

2. RESULTATS

Le tableau I.1 donne pour chacun des 4 génotypes dans les trois conditions hydriques, les valeurs moyennes d'avancement du front racinaire (cm/jour) entre la germination et la 5^e semaine (montaison);

Tableau I.1 : Vitesses moyennes d'avancement du front racinaire entre la germination et la 5^e semaine (cm/jour, moyenne \pm écart-type).

	IC30	IC27	HKP	SAUVAGE
C1	1.6 \pm 0.2	2.1 \pm 0.5	1.9 \pm 0.5	1.3 \pm 0.8
C2	3.3 \pm 0.3	3.5 \pm 0.3	3.3 \pm 0.3	2.6 \pm 1.6
C3	3.0 \pm 0.3	2.9 \pm 0.3	2.9 \pm 0.4	2.7 \pm 1.5

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 2 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 on constate que jusqu'à la 3^e 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 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 (traitement C3) ou tardif (traitement 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).

Le tableau I.2 distingue les trois premières semaines de début de croissance de la période qui suit.

Tableau I.2 : Vitesses moyennes d'avancement du front racinaire (cm/jour) pour les semaines 1 à 3 et 4 et 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

Après 4 semaines, en absence de déficit hydrique, la variété IC27 montre une colonisation du rhizotron à la fois plus dense sur les 60 premiers centimètres et plus profonde que les variétés HKP et IC30. Sauf pour la forme sauvage dont l'enracinement est faible et uniforme sur 60 cm de profondeur, les densités racinaires apparaissent plus fortes en surface qu'en profondeur.

Tableau I.3 : Profils de densité racinaire en condition C1: irrigation journalière.

Prof. (cm)	IC30	IC27	HKP	SAUVAGE
0	4	5	4	2
20	4	5	4	2
40	3	5	3	2
60	2	1		
80		1		
100				

En revanche, en situation de déficit hydrique (tableaux I.4 et I.5) la densité de racines est plus faible en surface qu'en profondeur. Les rhizotrons sont colonisés par les racines jusque dans leur partie inférieure, sans différence sensible entre les quatre génotypes testés.

Tableau I.4: Profils de densité racinaire en condition C2: réserve maximale au semis et sans irrigation ultérieure.

Prof (cm)	IC30	IC27	HKP	SAUVAGE
0	2	3	2	2
20	3	2	3	2
40	4	4	4	3
60	2	3	2	3
80	1	2	2	1

Tableau I.5 : Profils de densité racinaire en condition C3: réserve maximale seulement en profondeur, au semis et sans irrigation ultérieure.

Prof. (cm)	IC30	IC27	HKP	SAUVAGE
0	3	2	3	2
20	2	2	2	2
40	3	3	3	2
60	3	3	3	3
80	2	3	3	2

3. CONCLUSION

L'essai a permis de mettre en évidence deux points essentiels :

- l'effet du stress hydrique sur la croissance et la forme du système racinaire du mil: en phase d'installation des plantes, l'avancement du front racinaire est stimulé par un déficit hydrique, que celui-ci soit précoce ou tardif. Cette extension verticale du système racinaire s'accompagne d'une colonisation plus importante des horizons humides. Hormis pour la forme sauvage dont l'enracinement est généralement moins rapide et moins dense que celui des formes cultivées, la réaction des plantes est la même entre les cultivars.

- deux types d'enracinement semblent se dégager: un enracinement profond qui, même en condition d'irrigations fréquentes, colonise le sol en profondeur (IC27) et un enracinement plus superficiel susceptible de s'étendre en profondeur en cas de déficit hydrique (IC30, HKP et sauvage).

II. ESSAI DE CONTRE SAISON FROIDE 1988-1989

1. CADRE EXPERIMENTAL

1.1. Le climat

Le tableau II.1 (Cf. fin du chapitre) donne les moyennes des principaux paramètres climatiques pour les environs de Niamey (Sivakumar, 1986) et le tableau II.2 (Cf. fin du chapitre) les valeurs pour les années d'expérimentation 1988-1989 et 1990. Sur toute l'étendue du Niger méridional (zone à vocation agricole) on observe :

- une saison de pluie estivale courte, à vents dominants humides du sud-ouest. La pluviométrie annuelle moyenne est de l'ordre de 500 mm, mais variable en quantité et aléatoire dans sa distribution. 75% des pluies tombent durant les mois de juillet, août et septembre;
- une saison sèche de 7 à 10 mois à vents continentaux de secteur nord-est (harmattan);
- une insolation de l'ordre de 3000 heures par an. Des températures élevées, jusqu'à 40°C en mars, avril et mai. Une hygrométrie moyenne faible, rarement plus de 50% sauf en saison des pluies.

La période de contre-saison froide se situe de mi-novembre à mi-février. Elle est caractérisée par des températures moins élevées (maximum 32°C), des humidités relatives faibles (moins de 15% à 12H) et une pluviométrie nulle. La contre-saison chaude s'étend sur les mois de mars à mai. Les températures plus élevées (plus de 40°C), la demande évaporative va jusqu'à 8 mm/j et les humidités relatives sont faibles jusqu'à l'arrivée des premières pluies, fin mai début juin.

Dans l'ensemble, les années d'essai 88, 89 et 90 se rapprochent d'une année normale, en dépit des écarts pluviométriques.

1.2. Le sol

L'essai a été conduit sur un sol ferrugineux tropical peu lessivé, développé sur un matériau sableux. Les principales caractéristiques physiques et chimiques sont résumées dans le tableau II.3. La fraction fine constituée essentiellement de kaolinite et de sesquioxydes, est faible et varie d'un site à l'autre (entre 1 et 15%). Sur la base des taux d'argile et de sable fin, on peut distinguer le site 4 des sites 1, 9

et 12. D'une manière générale, la matière organique est caractérisée par un C/N inférieur à 10, le sol est profond et perméable, la capacité de rétention en eau variant de 70 à 80 mm dans le premier mètre de sol (Daouda *et al.*, 1991).

2. MATERIEL ET METHODES

Le dispositif statistique est un essai factoriel à deux facteurs (un facteur variétal à 4 niveaux, un facteur hydrique à 2 niveaux) à 4 répétitions non randomisées (3 pour le mil sauvage) regroupées en deux parties égales correspondant chacune à un des traitements hydriques (fig. II.1).

2.1. Le matériel végétal

Il s'agit de quatre génotypes de mil (*Pennisetum glaucum*) à cycle moyen de 90 jours, présentant des comportements contrastés face au stress hydrique post-floral :

- HKP, variété sélectionnée par l'IRAT, vulgarisée par l'INRAN, considérée comme résistante à la sécheresse;
- ICMVIS85327 et ICMVIS86330, cultivars améliorés par l'ICRISAT, ayant montré des comportements opposés face à un stress hydrique terminal (Bidinger *et al.*, 1988), désignés respectivement IC27 et IC30, par la suite;
- un mil sauvage (*Subspecies violaceum*), supposé être résistant.

Ils constituent le facteur variétal d'un essai comparatif de la croissance et du développement du mil sous alimentation hydrique différenciée.

2.2. L'alimentation hydrique

L'alimentation hydrique représente le second facteur étudié. A partir de la floraison, l'irrigation jusqu'alors uniforme fait place à deux traitements hydriques:

- un traitement irrigué où l'arrosage se poursuit tout au long du cycle cultural,
- un traitement stressé où l'irrigation est interrompue à la floraison pour provoquer un stress hydrique post-floral.

L'irrigation au goutte à goutte est conduite au moyen de goutteurs de 4l/h de débit, à raison de deux goutteurs par mètre sur la ligne de semis. L'apport d'eau est quotidien en début de cycle, puis il est effectué tous les 2 jours. La dose est

calculée sur la base de l'ETP PENMAN (moyenne 1949-1984) et des coefficients culturaux établis par Dancette (1983).

2.3. Conduite de l'essai

Les quatre variétés sont semées en poquets (démariés à trois brins), avec un espacement de 1m x 1m (densité de 10000 poquets par hectare). Le semis a été fait le 27 octobre 1988 et la récolte le 16 février 1989. 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 mortaison. Les sarclo-binages et les traitements phytosanitaires ont été effectués dès que nécessaire.

2.4. Méthode d'estimation de la biomasse racinaire

2.4.1. Le carottage racinaire

Cette étape consiste à prélever des échantillons de terre ou carottes d'un volume connu à différentes profondeurs, et à extraire les racines par lavage à l'eau. Le carottier que nous avons utilisé a un diamètre de 70 mm et 200 mm de hauteur, soit un volume utile de 770 cm³.

Sur chacune des répétitions (un poquet par parcelle élémentaire), les prélèvements sont faits dans 2 plans privilégiés: sur la ligne de semis et perpendiculairement à la ligne de semis (figure II.2). Trois sites de carottage caractérisent chaque plan de mesure: sous le poquet, à 25 cm et 50 cm du poquet. Les carottes sont prélevées tous les 20 cm jusqu'à 140 cm de profondeur.

2.4.2. La méthode de calcul de la masse de racine

Cette méthode a été mise au point en 1990 par Thiéry *et al.* (Cf. annexe). Par carottage on mesure la densité volumique de racines, exprimée en mg de racine/cm³ de sol, en 7 profondeurs et sur 5 sites par poquet, ce qui donne 35 mesures par poquet. Le principe de calcul de la masse de racines est l'intégration de la densité volumique sur l'ensemble du poquet. Le voisinage du poquet est divisé en 8 octants, tenant compte de la dissymétrie due à l'irrigation en ligne de goutteurs:

- deux octants sont axés sur la ligne de l'irrigation,
- deux octants sur la ligne perpendiculaire;
- quatre octants sur la diagonale.

Au niveau de chaque octant on passe de la densité volumique à la densité surfacique par une projection sur l'un des plans de base de l'octant. Pour obtenir la

masse il suffit d'intégrer sur le plan de projection, puis de faire la somme des 8 octants. L'octant diagonal est considéré comme la moyenne des deux autres octants.

2.5. Mesure de l'eau du sol

Le suivi de l'humidité du sol est assuré par la méthode neutronique, sur des tubes d'accès de 2 mètres de profondeur utile. Les relevés des profils hydriques sont effectués une fois tous les deux jours pendant la phase de stress hydrique. Une des 4 placettes-répétitions est affectée au bilan hydrique et comporte un tube de mesure neutronique, situé en interligne de semis entre deux poquets.

3. RESULTATS

3.1. Caractérisation de la parcelle avant l'application du stress hydrique

3.1.1. Les stocks hydriques avant l'application du stress

Le tableau II.4 donne les stocks hydriques à l'arrêt de l'irrigation (JAE 60), pour chacun des génotypes au niveau de la parcelle de bilan.

Tableau II.4 : stocks hydriques (mm) à l'arrêt de l'irrigation (JAE 60) ; CC = Capacité au champ.

Prof(cm)	IC30	IC27	HKP	SAUVAGE
0-50	46	47	38	48
50-100	53	67	76	72
100-150	91	102	126	105
150-200	100	106	137	110
0-200	291	322	377	335
Stock CC	275	357	357	357

On constate, d'une part, que les réserves sont pleines au moment de l'arrêt de l'irrigation, et d'autre part qu'elles sont comparables entre les génotypes, sur le premier mètre de sol.

3.1.2. La biomasse aérienne des cultivars

Le tableau II.5 donne les valeurs de quelques paramètres morphologiques aériens, 59 jours après émergence, 3 jours avant l'arrêt de l'irrigation.

Tableau II.5 : Biomasse aérienne des trois cultivars à 59 JAE (SFv: surface foliaire verte, cm²; nb T: nombre de tiges; MSt: matière sèche aérienne totale, g/m²).

	IC30	IC27	HKP
SFv	6991	4768	5152
nb T	13	11	8
MSt	214	200	152

Il ressort de ce tableau, que le cultivar IC30 a une biomasse aérienne plus importante que les autres géotypes au départ du stress hydrique. Il a une surface d'échange (surface foliaire verte) et un nombre de talles plus élevés que les deux autres cultivars.

3.2. L'évolution au cours du stress hydrique

3.2.1. L'évolution des stocks hydriques

Le tableau II.6 donne les variations de stock au cours de la période du déficit hydrique. En négligeant le drainage en profondeur (stocks hydrique voisins des réserves à la capacité au champ : Cf tableau II.1) on peut les assimiler aux consommations en eau des cultures.

Tableau II.6 : Variations de stock (mm) au cours de la période du déficit hydrique. (VSX: pourcentage de variation par rapport au stock initial).

Prof(cm)	IC30	IC27	HKP	SAUVAGE
0-50	36	34	24	35
50-100	26	33	37	35
100-150	46	28	40	31
150-200	33	32	24	24
0-200	142	127	125	125
VSX	49	39	33	37

On constate un comportement identique de IC27, HKP et du sauvage, comportement différent pour IC30 : sur 50 jours, IC30 a évaporé 142 mm contre 125 en moyenne pour les trois autres géotypes.

Le tableau II.7 donne pour chaque géotype, la répartition entre les couches 0-100 et 100-200 cm de l'eau consommée au cours de deux périodes consécutives (0-10 et 10-50 jours après le début de stress).

Tableau II.7 : Répartition dans le sol de l'eau consommée par les différents génotypes au cours du déficit hydrique (% de la consommation totale de chaque période, JADs: jours après le début de stress)

JADS	IC30		IC27		HKP		SAUVAGE	
	0-10	10-50	0-10	10-50	0-10	10-50	0-10	10-50
Prof(cm)								
0-100	72	27	80	52	75	42	85	44
100-200	28	73	20	48	25	58	15	56

Au cours des 10 premiers jours, les trois quarts environ de l'eau consommée par les cultures proviennent du premier mètre de sol, sans différence notable entre les quatre génotypes. En revanche au cours des 40 jours suivants, le cultivar IC30 extrait plus d'eau en profondeur (73%) que les trois autres qui restent comparables entre eux. Ceci se voit clairement à travers les figures II.3, II.4 et II.5, présentant les variations journalières de stock au cours du stress hydrique. La figure II.3 compare IC30 à la moyenne des autres génotypes. On constate que 15 jours après l'application de la contrainte hydrique, la diminution de stock est encore élevée chez le premier alors qu'elle tombe à moins de 2mm/jour chez les autres. Les figures II.4 et II.5 montrent que cette différence provient des couches profondes (100 - 150 cm) que le cultivar IC30 semble mieux exploiter.

3.2.2. L'évolution de la partie aérienne

Elle est représentée sur les figures II.6 à II.8 et concerne la surface foliaire verte, le nombre de tiges et le poids des épis des trois cultivars (moyenne par poquet).

La surface foliaire verte (figure II.6) diminue au cours du stress hydrique avec des pentes comparables entre les trois cultivars. Mais le cultivar IC30 qui avait au départ une surface foliaire verte supérieure de 40% à celle des deux autres variétés, conserve cette supériorité tout le long de l'essai. Il a de même un nombre de tiges supérieur à celui des autres variétés pendant toute la durée du stress hydrique (Fig. II.7).

L'évolution du poids des épis est identique pour les trois cultivars, jusqu'à 78 JAE (Fig.II.8). A partir de cette date, la masse des épis augmente fortement chez IC27 et surtout IC30, alors qu'elle n'évolue pratiquement plus chez HKP.

Le tableau II.8 donne la situation à 85 JAE. Le cultivar IC30 a une biomasse aérienne supérieure, en particulier au niveau du poids des épis : 62.7 g/poquet contre 43 et 27 pour IC27 et HKP respectivement.

Tableau II.8: Biomasse aérienne des trois cultivars à 85 JAE (SFv: surface foliaire verte, cm²; Epis et MSt: poids d'épis et de matière sèche totale, g/m²)

	IC30	IC27	HKP
SFv	2940	1544	904
Epis	63	43	27
MSt	213	133	106

3.3. Caractérisation de la parcelle à la récolte

3.3.1. Les stocks hydriques à la récolte

Ils sont donnés dans le tableau II.9. Les zones les plus humides au moment de l'application du stress hydrique restent les plus humides à la fin. Les horizons de surface (0 - 100 cm) sont bien asséchés de façon uniforme par tous les cultivars. Ceci est également illustré par la figure 2.4.

Tableau II.9: Stocks hydriques (mm) à la récolte.

Prof(cm)	IC30	IC27	HKP	SAUVAGE
0-50	11	12	15	13
50-100	26	35	39	37
100-150	45	74	86	74
150-200	67	74	113	86
0-200	149	195	253	210

3.3.2. La biomasse aérienne à la récolte

Les rendements en matière sèche totale et en grain sont donnés dans tableau II.10. Les rendements obtenus pour les parcelles de bilan hydrique sont comparables aux moyennes générales des 4 répétitions, pour chaque cultivar. Ce qui confirme la bonne représentativité de ces parcelles réservées au bilan hydrique.

Tableau II.10: Rendements en grains et matière sèche totale à la récolte (g/m²). Xi: moyenne pour le cultivar i; BH: valeur obtenue pour la parcelle du bilan hydrique.

	IC30		IC27		HKP	
	Xi	BH	Xi	BH	Xi	BH
grains	31	27	62	77	65	64
MSt	114	103	181	196	200	184

Le cultivar IC30, qui jusqu'au JAE 85 avait la plus forte biomasse aérienne, se retrouve à maturité avec une production de matière sèche totale et un rendement en grains inférieurs à ceux des deux autres cultivars.

3.3.3. La biomasse racinaire à la récolte

La distribution des racines dans le sol à la récolte, exprimée en mg de racines par cm³ de sol, est donnée dans les tableaux II.11 pour l'aplomb du poquet et II.12 pour la zone latérale autour du poquet.

Tableau II.11 : Densité de racines à l'aplomb du poquet (mg/cm³)

Prof(cm)	IC30	IC27	HKP	SAUVAGE
0-40	7.22	4.50	3.79	4.93
40-140	0.80	0.09	0.07	0.18

Tableau II.12 : Densité de racines latéralement autour du poquet (mg/cm³)

Prof(cm)	IC30	IC27	HKP	SAUVAGE
0-40	1.65	2.12	0.98	1.60
40-140	0.20	0.10	0.05	0.22

Sous le poquet, le cultivars IC30 se distingue des autres génotypes par une densité racinaire sensiblement plus forte, notamment en profondeur.

Latéralement aussi IC30 est celui des trois cultivars qui développe la plus forte biomasse racinaire en profondeur, à égalité avec le mil sauvage. En surface, c'est IC27 qui colonise le mieux le sol.

Au total, IC30 et le mil sauvage parviennent à une meilleure occupation des horizons de profondeur à la récolte, tandis que HKP montre le plus faible développement racinaire des trois cultivars.

4. DISCUSSION-CONCLUSION

L'évolution de la biomasse aérienne et la consommation en eau au cours du stress hydrique, ainsi que la structure de la plante à la récolte sont résumées dans le tableau II.13.

Le cultivar IC30 ayant, au moment de l'application du stress, la biomasse aérienne la plus importante, montre entre 78 et 85 JAE la plus forte augmentation du poids d'épis (Fig. II.8). Cette croissance rapide des épis est liée à une surface foliaire verte (source d'assimilats carbonés) supérieure à celle des deux autres cultivars et à une consommation en eau importante soutenue notamment par l'exploitation des horizons profonds entre 72 et 82 JAE (Fig. II.5).

La consommation en eau, de même que les surfaces foliaires initiales des deux autres cultivars sont pratiquement égales, mais IC27 se distingue de HKP en maintenant sa surface foliaire verte plus longtemps: entre 77 et 85 JAE, sa surface assimilatrice est en moyenne supérieure de 50% à celle de HKP (Fig. II.6). Dans le même temps, le poids de ses épis augmente encore fortement, tandis que HKP ne varie plus.

A partir de 85 JAE, la consommation en eau devient inférieure à 2mm/jour pour tous les génotypes, et la croissance des épis de IC30 et HKP se trouve bloquée. Malgré un poids d'épis supérieur, IC30 produit à la récolte moins de grains que les deux autres cultivars.

Ainsi, le cultivar ayant la biomasse la plus importante avant l'application du stress s'est comporté le mieux face à la sécheresse pendant les 25 jours de déficit hydrique. On peut penser qu'il aurait produit le plus de grain (ayant le poids d'épis le plus élevé) à maturité si le déficit hydrique, au lieu de se prolonger encore deux semaines, avait été interrompu à 85 JAE.

Cependant, une baisse de matière sèche totale est enregistrée à la récolte. Où est passée cette biomasse ? Nous avons observé en rhizotron et en phase d'installation (Cf. 1ère partie) un effet de rhizogénèse lié au stress hydrique. Le phénomène est-il le même, et la biomasse aérienne perdue au cours du stress aurait-elle été affectée à l'extension du système racinaire ? Ceci expliquerait en partie le développement important du système racinaire et le faible rendement en grains observés chez le cultivar IC30. Pour le préciser, il faudra suivre en parallèle l'évolution des biomasses souterraine et aérienne au cours du stress.

Tableau 11.13 : Récapitulatif des résultats (+++: fort; ++: moyen; + faible).

	IC30	IC27	HKP	SAUVAGE
Mst initiale(59JAE)	+++	++	+	
Mst (85 JAE)	+++	++	+	
Mst récolte (109 JAE)	+	+++	+++	
racine récolte (109 JAE)+++		++	+	+
eau consommée 59 à 109 JAE	142	127	125	125

Il est à noter que les résultats présentés, reposant sur 2 et 4 répétitions additionnées respectivement pour les biomasses aériennes et racinaires et sur un sondage neutronique par parcelle pour le bilan hydrique, méritent d'être vérifiés. En revanche, la similitude de comportement entre d'une part IC30 et le mil sauvage et d'autre part IC27 et HKP, déjà constatée en phase d'installation (essai rhizotron), n'est pas le fait de hasard et mérite plus d'investigations.

Tableau II.1: Paramètres climatiques des environs de Niamey (Sivakumar 1986).

		J	F	M	A	M	J	JE	A	S	O	N	D	AN
Température de l'air (C°)	maxi	32.9	35.9	39.0	40.9	33.7	32.1	33.7	32.1	33.1	33.9	37.4	33.4	36.0
	moy	24.4	27.2	30.9	33.6	33.7	31.1	28.7	27.5	28.6	30.5	27.8	24.9	29.1
	mini	15.9	18.4	22.8	26.3	27.4	25.4	23.6	22.9	23.3	23.6	19.2	16.4	22.1
ensoleillement (h/j)		9.4	9.5	9.0	8.3	8.9	8.7	8.0	6.9	7.9	9.3	9.7	9.3	8.7
rayonnement solaire (Mj/m2)		19.8	20.6	21.6	20.7	21.8	21.0	20.8	19.2	20.2	20.8	19.8	18.3	20.4
Humidité relative de l'air (%)	6H	33	29	28	40	61	75	84	91	89	77	52	41	58
	12H	13	12	12	19	35	46	58	69	61	39	17	16	33
Tension de vapeur(mb)		6.7	6.0	8.5	13.5	21.5	24.5	26.1	27.0	27.1	23.0	12.5	8.0	17.0
évapotranspiration(mm/j)		6.9	8.3	8.8	8.1	7.8	6.4	5.6	4.7	5.1	6.2	7.0	7.0	6.8
Pluie	Total(mm)	0.2	0.2	2.2	6.6	34.4	72.2	143.3	192.2	90.0	15.5	0.5	0	561.5
	CV (%)	833	563	332	203	95	52	37	39	51	154	578	2.6	137.0
	n (j)	0	0	1	3	7	7	10	13	8	2	0	0	44

Tableau 11.2: paramètres climatiques pour les années d'essai 1988-1989 et 1990.

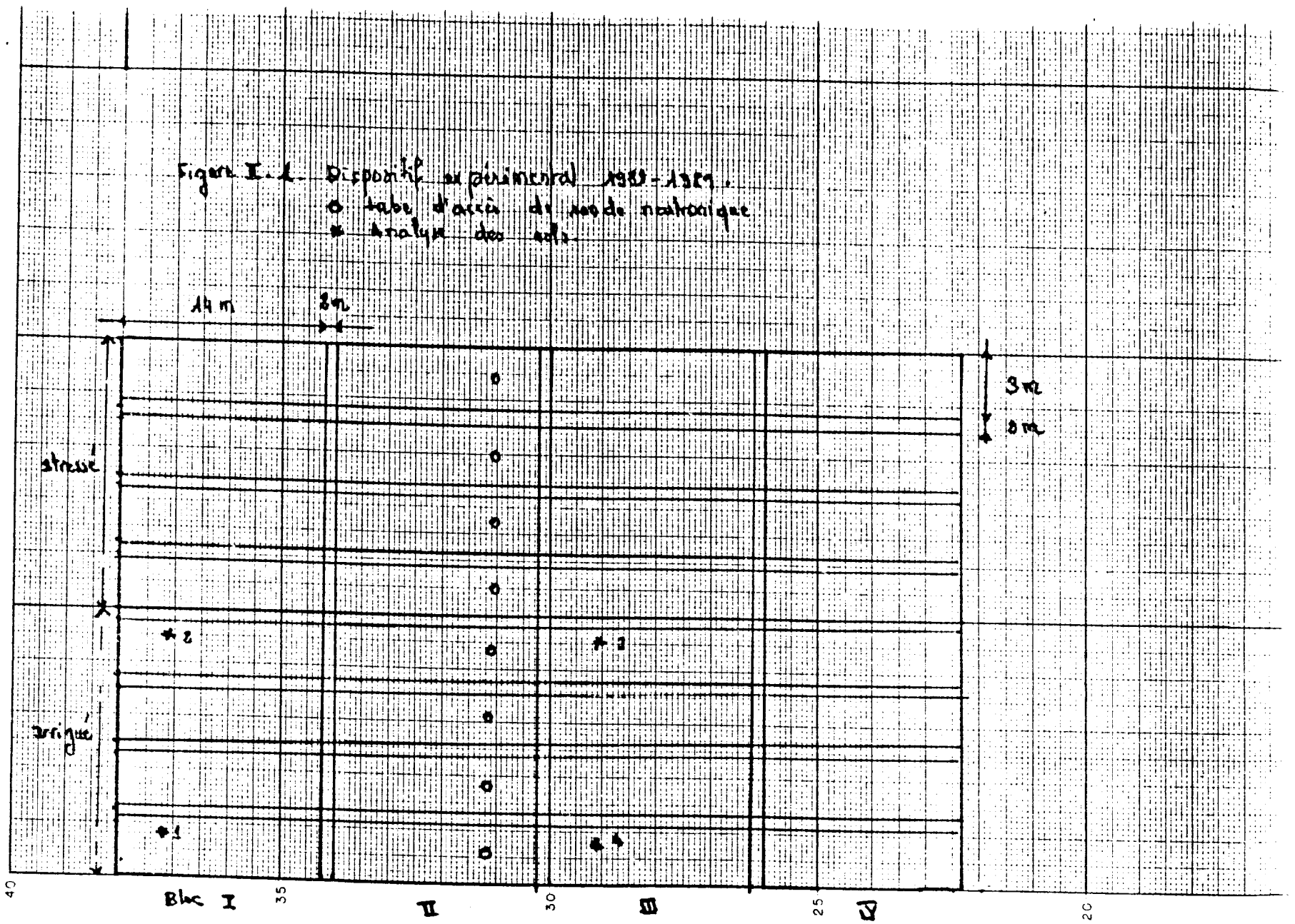
	1989					1988							AN
	J	F	M	A	M	J	JE	AT	S	O	N	D	
Température maxi	30.0	32.0	32.0	42.0	41.0	39.4	35.6	32.0	35.0	36.8	36.0	31.2	
mini	13.0	17.0	20.5	22.0	27.6	27.5	25.0	23.5	24.0	19.8	16.5	19.4	
Ensoleillement (heures/jour)	9.7	8.5	9.3	10.3	10.8	8.0	6.6	7.6	8.3	9.8	9.2	9.4	
Rayonnement (J/cm ²)													
Humidité relative 6h	38.0	30.9	40.8	30.0	51.3	59.9	74.7	87.4	83.6	59.8	66.6	42.9	
12h	13.0	12.0	13.0	13.6	26.0	38.0	47.0	66.0	55.0	26.0	17.5	14.4	
ETP	4.8	4.8	6.1	6.3	8.5	6.9	6.0	4.8	5.0	5.0	4.2	4.0	
Pluie	0.0	0.0	0.0	1.2	1.2	25.4	119.5	318.9	152.6	0.0	0.0	0.0	
1990													
	J	F	M	A	M	J	JE	AT	S	O	N	D	AN
Température maxi	32.6	33.1	36.4	41.3	40.6	38.4	32.6	31.4	35.4	38.4	38.0	35.2	36.1
mini	16.6	15.9	18.8	25.8	28.8	27.4	24.2	27.2	25.0	21.9	17.4	17.2	22.2
Ensoleillement (heures/jour)	9.5	8.7	9.9	8.4	9.9	9.5	7.40	9.7	8.3	9.9	10.0	8.9	9.2
Rayonnement (J/cm ²)	17.0	18.9	22.3	19.8								16.2	
Humidité relative 6h	49.5	42.1	31.4	47.7	59.5	65.3	62.4	80.8	78.1	68.9	56.2	52.6	57.9
12h	15.3	12.8	8.3	21.5	35.6	40.8	62.5	56.1	52.1	27.6	15.6	15.6	30.3
ETP	4.3	4.6	6.6	6.3	7.4	6.7	5.0	5.6	5.1	5.1	4.3	4.1	5.4
Pluie	0	0	0	0	75.7	89.9	113.2	113	82.4	0	0	0	474.2

Tableau II.3: caractéristiques physico-chimiques du sol. Parcelle de l'essai de contre-saison.
 Les sites 1, 4, 9 et 12 sont distants d'environ 10 à 30 m (voir plan parcellaire fig.1).

	horizon	granulométrie (%)					humidité équiv.	pH	C P1000	N P1000	C/N	éléments échangeables me/100g					CEC me/100g	
		argile	limon fin	limon gros.	sable fin	sable gros.						matière org.	P	Ca	Na	Mg		K
site 1	0-40	0.7	1.1	1.6	20.3	76.3	0.21	1.7	6.2	1.2	0.10	12	2.1	0.6	0.013	0.17	0.13	1.2
	40-150	1.7	1.5	0.9	29.4	66.5	0.05	2.0	5.4	0.3	0.06	5	2.9	0.6	0.015	0.16	0.074	1.3
	140-250	5.8	0.4	1.1	24.0	68.7	0.02	4.3	5.8	0.1	0.06	1.7	2.8	1.2	0.02	0.58	0.185	2.1
	240-260	3.6	0.9	1.3	21.0	73.2	0.02	3.2	6.0	0.1	0.05	2.0	0.9	1.0	0.027	0.45	0.20	1.6
site 4	0-50	2.5	0.7	1.3	28.5	67.0	0.07	2.0	6.1	0.7	0.08	8.7	2.4	0.9	0.047	0.32	0.157	1.6
	50-100	8.2	0.9	1.3	30.6	59.0	0.10	5.3	5.7	0.6	0.09	6.7	9.2	2.4	0.033	0.68	0.168	3.0
	100-180	8.7	1.8	2.4	7.2	39.9	0.07	5.9	6.1	0.4	0.07	5.7	4.7	2.4	0.033	0.61	0.089	3.0
	180-240	13.4	2.4	3.1	53.0	28.1	0.10	10.0	6.4	0.6	0.09	6.7	1.5	3.5	0.046	1.82	0.159	4.8
	240-260	7.1	1.4	2.6	62.3	26.6	0.02	6.0	6.9	0.1	0.06	1.7	0.5	2.1	0.031	1.08	0.119	2.9
site 9	0-50	1.7	0.5	1.2	21.6	75.0	0.12	1.6	6.1	0.7	0.08	8.7	3.3	0.4	0.011	0.12	0.076	1.0
	50-120	5.1	0.8	1.0	16.4	76.7	0.10	3.7	5.8	0.6	0.09	6.7	2.7	0.8	0.012	0.39	0.149	1.7
	120-200	4.9	0.2	0.5	14.5	79.9	0.07	3.8	5.4	0.4	0.08	5.0	3.3		0.017	0.39	0.110	1.8
	200-250	2.7	0.5	0.0	11.9	84.9	0.02	2.3	5.3	0.1	0.03	3.3	1.7	0.8	0.015	0.21	0.096	1.3
site 12	0-50	1.8	1.6	0.0	21.7	74.9	0.17	2.1	5.6	1.0	0.11	9.1	4.1	0.9	0.018	0.26	0.151	1.5
	50-150	4.1	0.7	0.8	21.5	72.9	0.07	3.4	6.3	0.4	0.07	5.7	9.4	1.4	0.018	0.44	0.15	1.4
	150-200	5.8	0.6	1.8	24.8	67.0	0.17	4.7	6.6	1.0	0.08	12.5	10.9	1.5	0.023	0.72	0.297	2.3
	200-250	3.1	0.3	1.1	20.9	74.6	0.07	2.9	7.0	0.4	0.03	13.3	4.6	0.9	0.017	0.22	0.454	1.3

NB: carbon organique méthode ANNE;
 azote méthode KJELDAHL;
 capacité d'échange méthode de METSON

Figure I.1. Dispositif expérimental 1988-1989.
 ○ tube d'accès de neutrons
 * analyse des sols



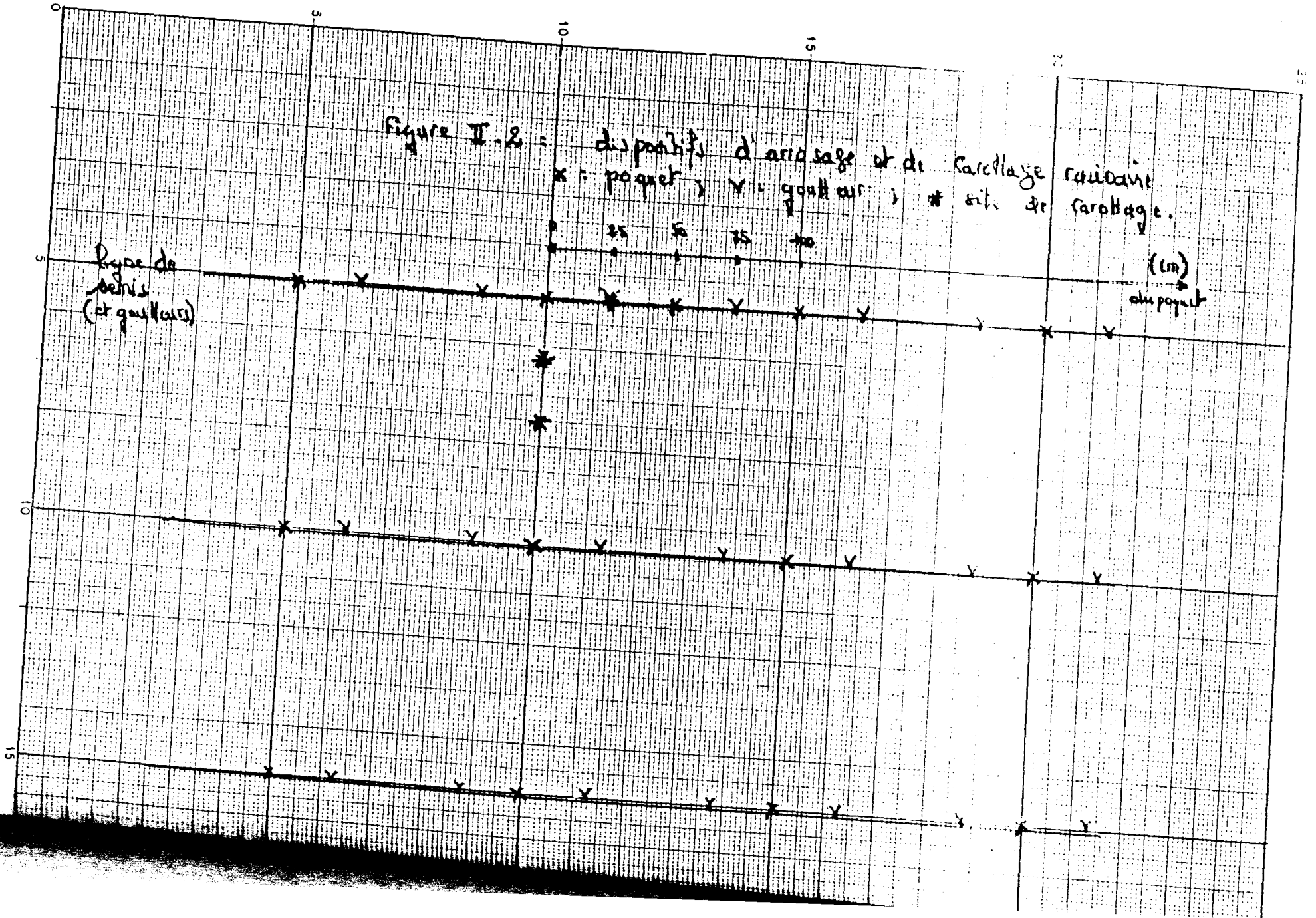


Fig. II.3: Diminution journalière de stock

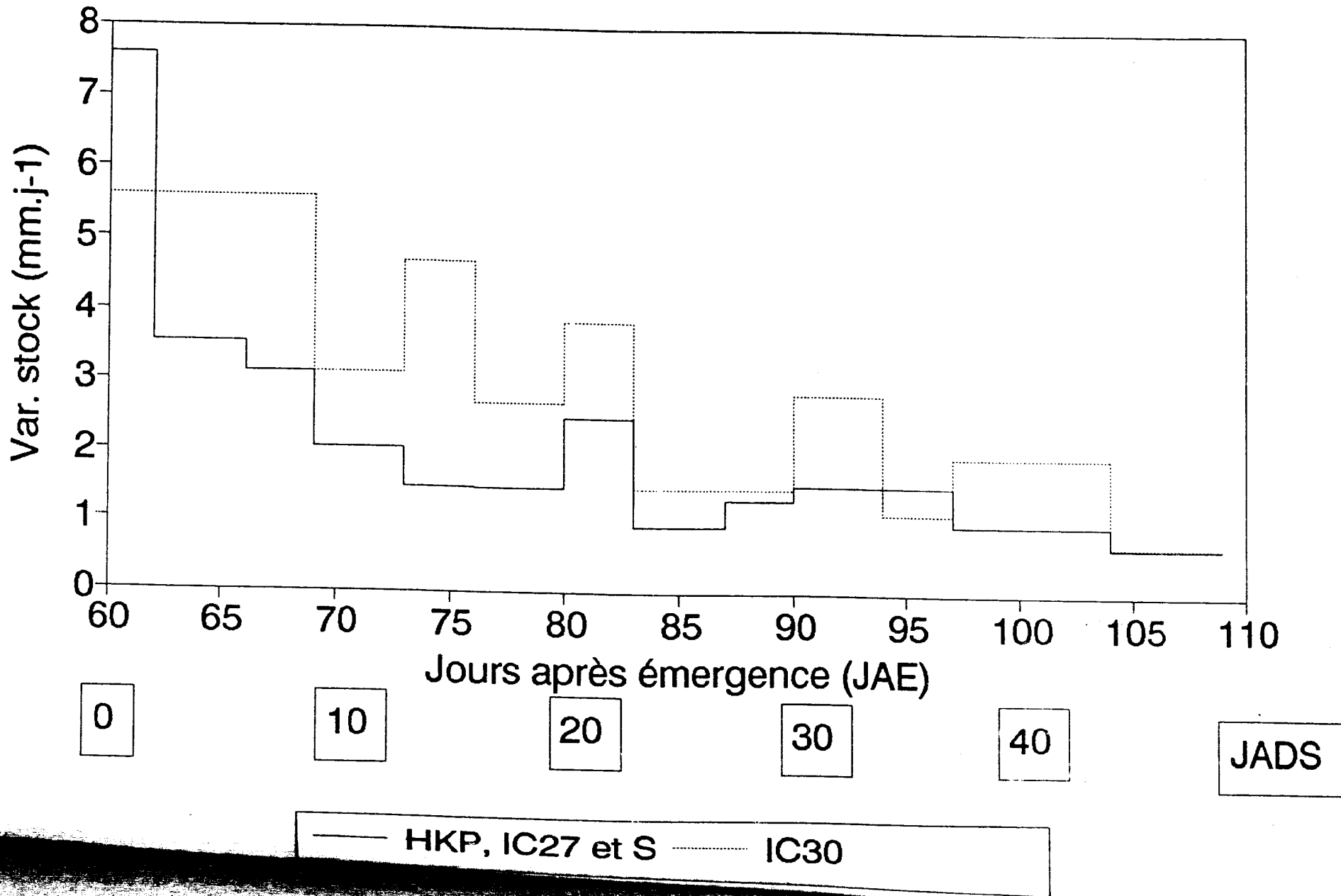


Fig. II. 4: Diminution journalière de stock
0-50 cm

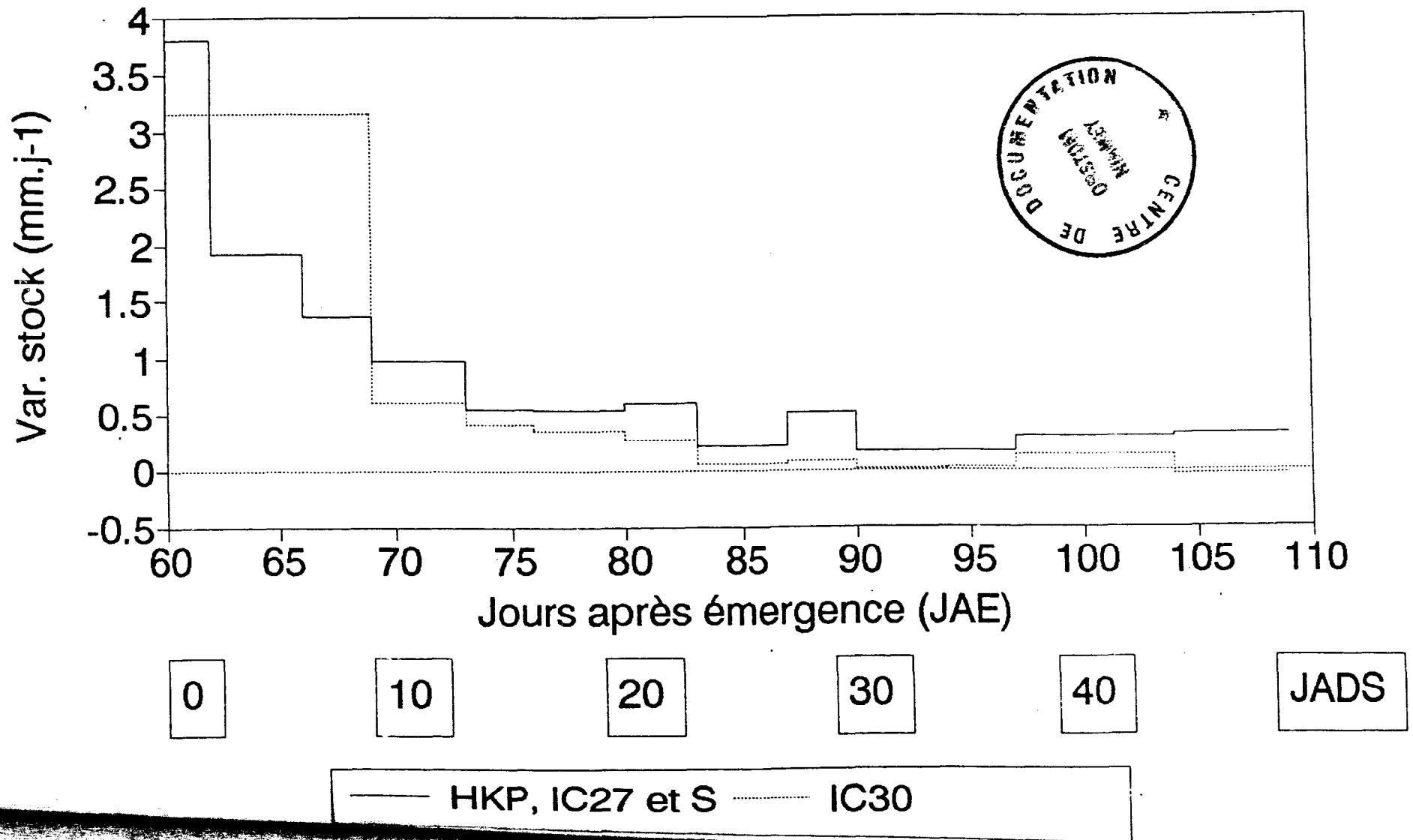


Fig. II.5: Diminution journalière de stock
100-150 cm

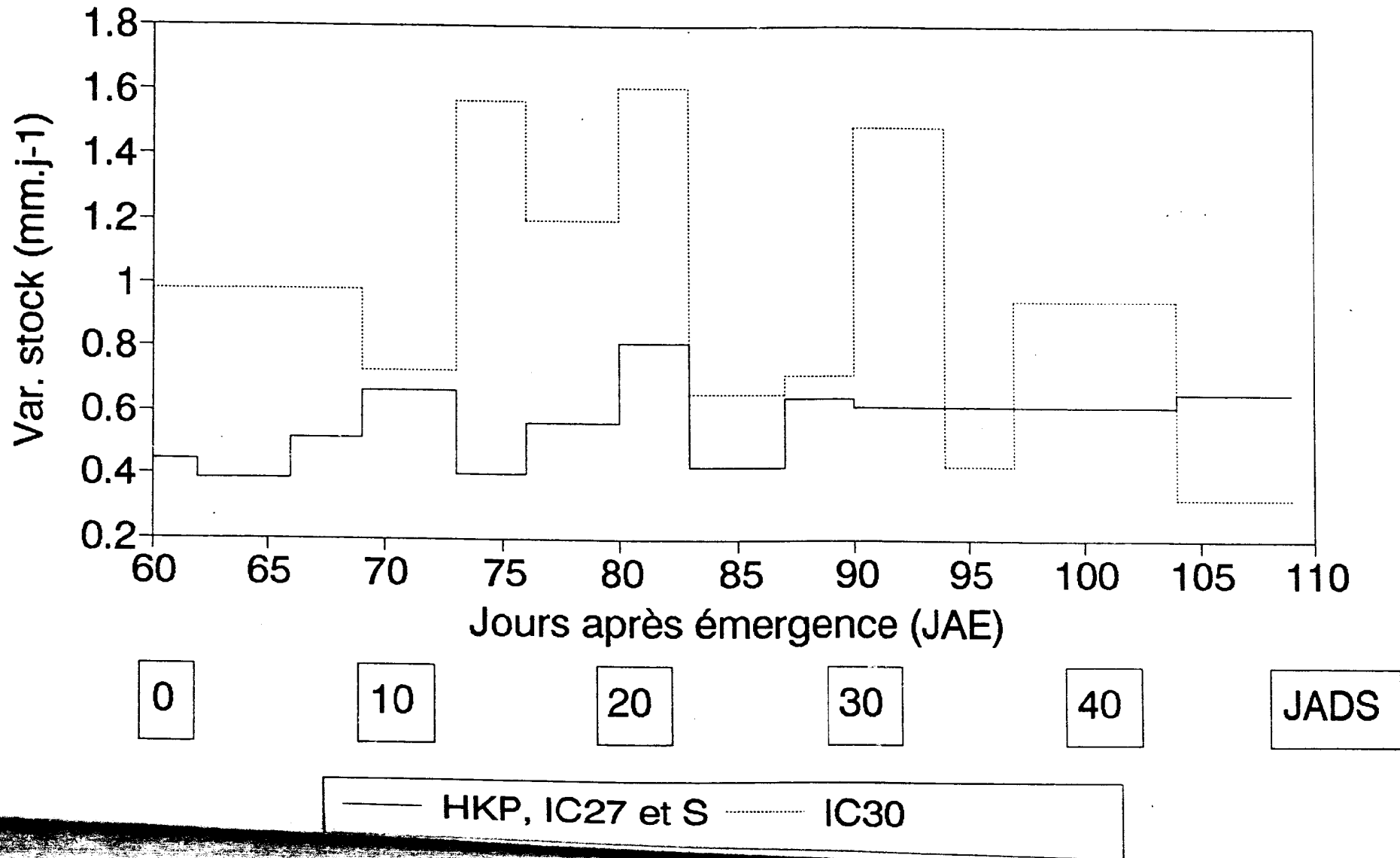


Fig. II.6: figure : biomasse aérienne 88-89

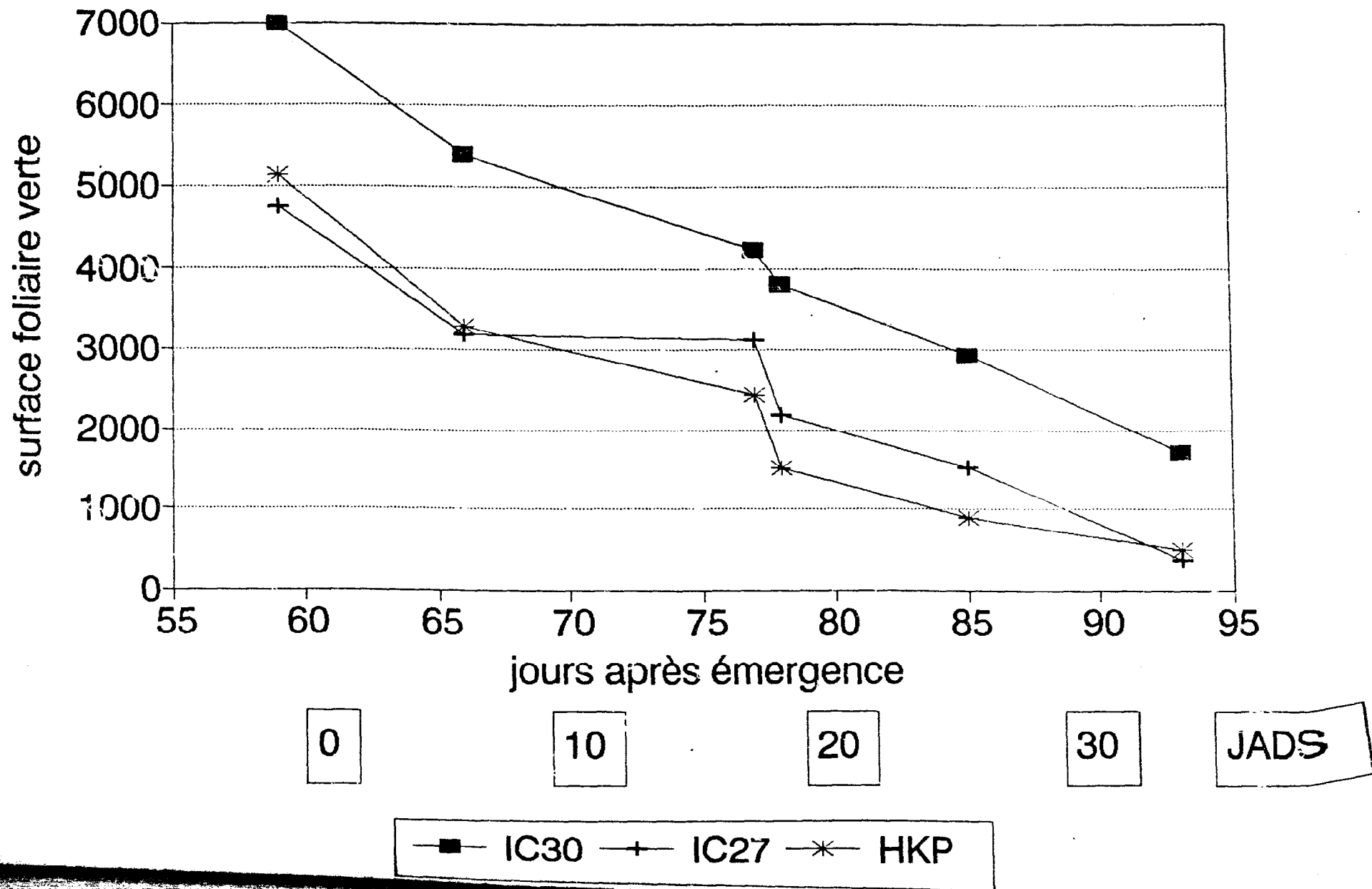


Fig. II.7: figure : biomasse aérienne 88-89

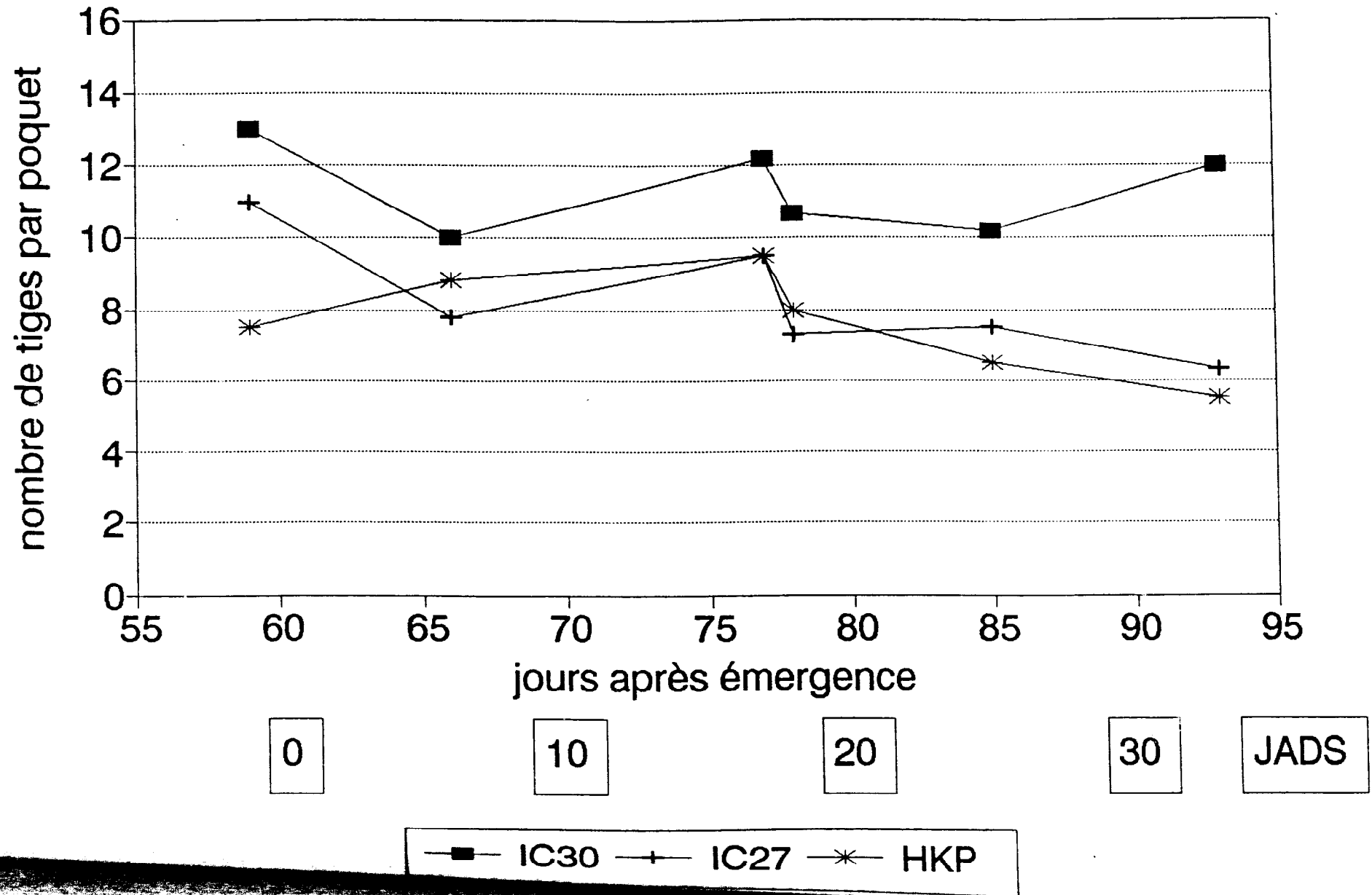
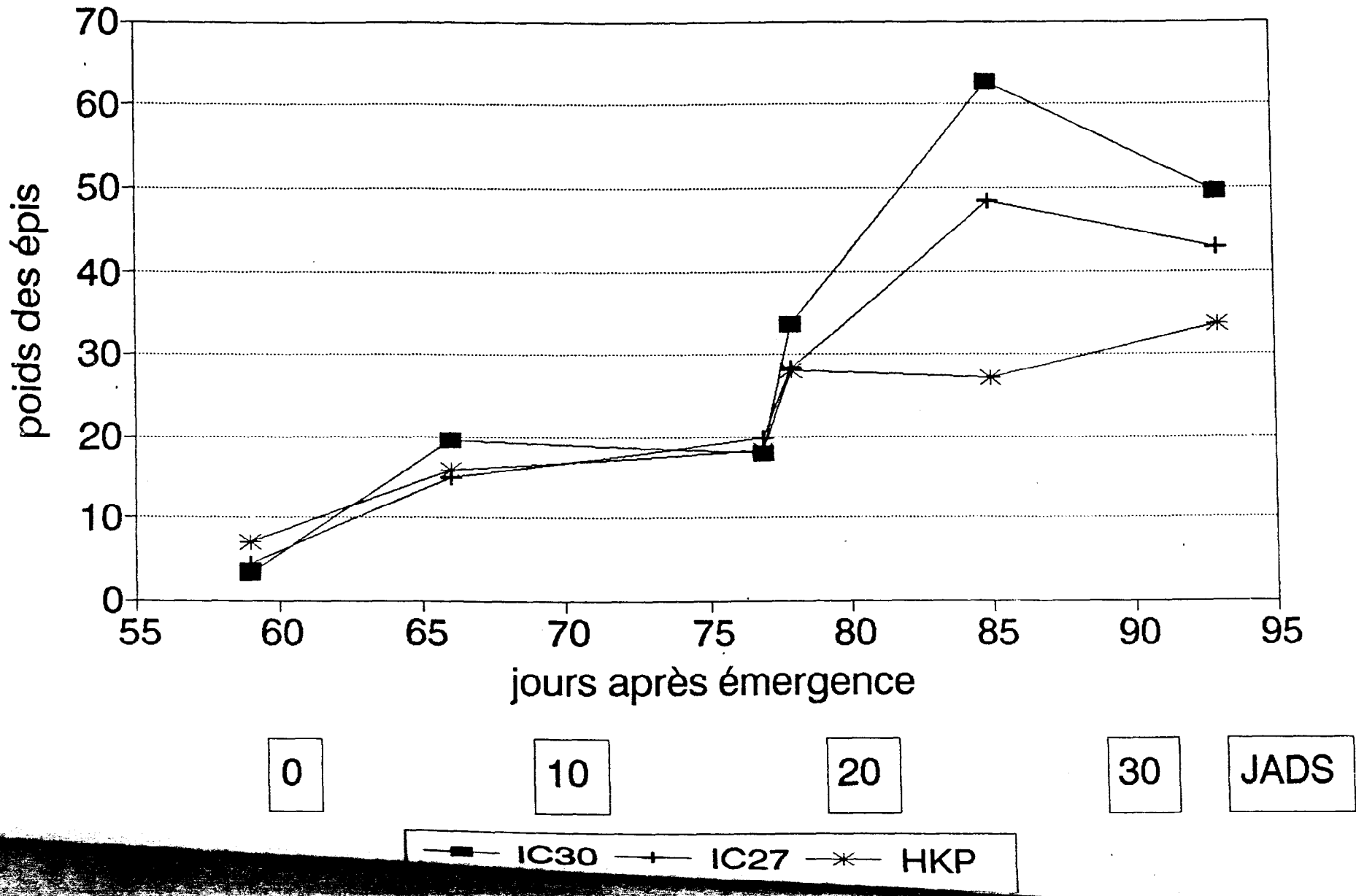


Fig. II.8 figure : biomasse aérienne 88-89



III. ESSAI DE CONTRE SAISON CHAUDE (FEVRIER-MAI 1990)

Résumé :

Le comportement du système racinaire face à un stress hydrique post-floral est étudié pour 3 cultivars de mil (*Pennisetum glaucum*) et un mil sauvage en plein champ en saison sèche et chaude. Il est mis en évidence une évolution du système racinaire après la floraison qui, dans le cas du traitement stressé peut aller jusqu'à un accroissement de biomasse de 53% par rapport à la floraison. Les variétés ayant montré des capacités opposées à maintenir le rendement face aux conditions hydriques déficitaires présentent des différences de structure racinaire dès la floraison en conditions normales, différences qui s'accroissent avec le déficit hydrique.

INTRODUCTION

Pour les variétés cultivées (IC30, IC27 et HKP), nous avons analysé la structure du système racinaire à la floraison (biomasse totale et distribution), sa dynamique en conditions d'alimentation hydrique déficitaire, ainsi que la quantité d'eau totale extraite par chacun des trois cultivars au cours du stress hydrique.

1. MATERIEL ET METHODES

L'essai est réalisé sur la même parcelle qu'en contre-saison froide 88-89. Pour améliorer la précision statistique le nombre de répétitions est porté à 6 pour les paramètres relatifs à la biomasse aérienne, à 4 pour les racines et à 8 pour ceux du bilan hydrique. Plus particulièrement pour les racines, un troisième plan de carottage (plan diagonal) a été introduit pour mieux cerner la distribution autour du poquet. Pour caractériser l'extraction de l'eau et l'avancement des racines deux positions par rapport au poquet ont été choisies (20 et 50 cm du poquet).

2. RESULTATS

2.1. Caractérisation de la parcelle au moment de l'application du stress hydrique

2.1.1. Les stocks hydriques de départ

Il s'agit des stocks hydriques calculés entre 20 et 200 cm de profondeur. Les mesures de surface entachées d'erreur n'ont pas été prises en considération. Cependant, les horizons de surface (0 - 30 cm) sont très homogènes sur tout le champ et a priori ne doivent pas gêner une étude comparative. Deux remarques essentielles se dégagent du tableau III.1:

- il y a une bonne uniformité entre les tubes à 20 et à 50 cm du poquet au niveau d'une même parcelle de bilan, malgré le mode d'irrigation utilisé (goutte-à-goutte). En effet, les bulbes d'humectation se sont rejoints à la floraison, avant l'arrêt de l'irrigation.

- il y a une hétérogénéité considérable des stocks hydriques entre les parcelles élémentaires allant de 114 à 187 mm, ce qui justifie la nécessité de plusieurs répétitions. Mais les moyennes générales de ces stocks initiaux ne diffèrent pas significativement entre les cultivars.

Tableau III.1. Stocks hydriques (mm) entre 20 et 200 cm avant l'arrêt de l'irrigation.

		IC30	IC27	HKP
20 cm du poquet	répétition I	128	135	186
	II		147	151
	III	151	147	127
	IV	139	157	187
	moyenne ± écart-type	139 ± 12	146 ± 9	163 ± 29
50 cm du poquet	I	114	127	155
	II	137	144	139
	III	158	146	125
	IV	144	149	187
	moyenne ± écart-type	138 ± 18	144 ± 13	151 ± 27
moyenne générale ± écart-type		139 ± 15	145 ± 10	157 ± 25

2.1.2. La biomasse aérienne à la floraison

Statistiquement il n'apparaît aucune différence significative entre variétés. Cependant, on note un développement végétatif (limbes verts, tiges et graines, matière sèche totale) en moyenne plus important pour IC27, tandis qu'IC30 montre un poids d'épis légèrement supérieur à celui des 2 autres cultivars. Il faut noter que, comparé aux autres cultivars, IC30 a une avance de 3 jours dans le développement végétatif de ses brins-mâtres.

Tableau III.2: biomasse aérienne à la floraison (moyenne et écart-type)

	IC30	IC27	HKP
Limbes Verts	39 ± 12	47 ± 10	38 ± 13
Tiges + Gaines	82 ± 16	115 ± 41	93 ± 25
Epis	28 ± 10	22 ± 10	15 ± 6
Matière Sèche totale	158 ± 30	201 ± 64	159 ± 42

2.1.3. La biomasse racinaire à la floraison

Le tableau des biomasses racinaires à la floraison (tableau III 3) montre également une nette supériorité du cultivar IC27 (significative au seuil de 1% entre 0-40 et 0 - 200 cm de profondeur).

Tableau III.3 : Biomasse racinaire à la floraison (g/m²)
(moyenne ± écart-type)

Prof (cm)	IC30	IC27	HKP
0-40	40 ± 11	70 ± 14	48 ± 8
40-200	6 ± 2	18 ± 6	15 ± 5
0-200	46 ± 12	88 ± 13	63 ± 10

Tableau III.4 : Répartition de la biomasse racinaire dans le profil
(% de la biomasse racinaire totale)

Prof (cm)	IC30	IC27	HKP
0-40	87	79	76
40-200	13	21	24

En terme de distribution verticale, les cultivars IC27 et HKP colonisent le sol plus en profondeur que IC30 qui reste superficiel. Une observation similaire a déjà été faite en rhizotron, en a phase d'installation des plantes.

Ainsi, avant l'application du stress hydrique (60 JAE), le cultivar IC27 montre un développement végétatif plus important que les 2 autres cultivars, tant au niveau aérien qu'au niveau racinaire. Cependant, en ce qui concerne le poids des épis, le cultivar IC30 montre une supériorité, probablement à mettre en relation avec les 3 jours d'avance qu'il avait dans son développement végétatif, et qui correspondent à 3 jours de remplissage des épis.

2.2. Evolution des stocks en eau du sol et des paramètres morphologiques des plantes au cours de la contrainte hydrique.

2.2.1. L'évolution des stocks hydriques

Les variations de stock hydrique ont été mesurées après 12 jours de contrainte. Le tableau III.5 donne les valeurs cumulées entre 20 et 200 cm de profondeur mesurées à 20 et 50 cm de distance du poquet.

On constate que les variations de stock sont comparables à 20 et 50 cm du poquet pour une même cultivar. Les différences entre cultivars ne sont pas significatives mais IC27 a la plus forte valeur absolue.

Tableau III.5 : Variation de stock (mm) au cours de la contrainte hydrique, sur 20 - 200 cm de profondeur. (M: moyenne des mesures à 20 et 50 cm de distance)

Distance (cm)	IC30	IC27	HKP
20	-27.4 ± 5.4	-32.4 ± 6.5	-31.8 ± 12.5
50	-22.8 ± 6.5	-30.0 ± 5.7	-20.8 ± 15.6
Moyenne	-25.1 ± 6.1	-31.2 ± 6.0	-26.3 ± 14.1

En figure III.1 est présentée la distribution verticale de la variation moyenne de stock pour chacun des trois cultivars. Dans les horizons intermédiaires (80 - 140 cm) elle est plus importante sous le cultivar IC27.

2.2.2. L'évolution de la partie aérienne au cours de la contrainte hydrique (62 à 77 JAE)

L'évolution de la biomasse aérienne entre 62 et 77 JAE se caractérise par une réduction de la matière sèche aérienne totale, et notamment une forte diminution du poids de limbes verts, correspondant à une sénescence foliaire. Seules les épis maintiennent leur croissance, déjà bien amorcée pour IC30 avant la contrainte hydrique.

2.2.3. Evolution de la partie aérienne après la réirrigation (77 à 92 JAE)

La réirrigation intervenue à 77 JAE (après 15 jours de contrainte) se traduit globalement par une augmentation de la biomasse aérienne totale (tableau III.6). Cette augmentation est le fait, principalement du maintien de la croissance des épis et dans le cas d'IC30, de la reprise de croissance des tiges et des gaines.

2.3. Caractérisation de la parcelle à la récolte

2.3.1 La biomasse aérienne à la récolte

La structure de la biomasse aérienne à la récolte est résumée dans le tableau II.7. On remarque que IC30 a pu rattraper IC27 sur le plan du développement végétatif, grâce à la reprise de croissance après la réirrigation. Le cultivar IC27, à la structure plus développée (limbes verts, épis et tiges + gaines) a produit plus de grains que HKP.

Tableau III.7 : Biomasse aérienne à la récolte
(moyennes et écarts types en g/m²)

	IC30	IC27	HKP
Limbes Verts	13 ± 2	16 ± 11	12 ± 5
Epis	64 ± 22	51 ± 13	40 ± 11
Tiges + Gaines	91 ± 14	85 ± 28	77 ± 8
Matière Sèche totale	213 ± 26	195 ± 55	177 ± 25
Rendement Grains	20 ± 6	17 ± 5	13 ± 3

2.3.2. La biomasse racinaire à la récolte

La situation de la biomasse racinaire en fin de cycle est résumée dans le tableau III.8. IC30 a la masse de racines la plus importante; 56 contre 40 g/m² pour les deux autres cultivars. Ceci correspond à un accroissement de 21% par rapport à la floraison pour IC30 et une baisse de -53 et -36% respectivement pour IC27 et HKP.

Tableau III.8 : Biomasse racinaire à la récolte et variation
par rapport à la floraison (moyenne et écart type en g/m²)

	IC30	IC27	HKP
Récolte	56 ± 11	41 ± 20	40 ± 8
Variation	+10 ± 7	-47 ± 18	-23 ± 8
Récolte/Floraison (%)	21	-53	-36

3. DISCUSSION - CONCLUSION

Les résultats de l'essai 1990 sont résumés dans le tableau III.9. Le cultivar IC30 qui avait une avance de 3 jours sur le cycle de développement a montré la plus forte production de grain à maturité, malgré un système racinaire initialement moins développé que ceux de IC27 et HKP. Cette situation illustre comment, pour le mil aussi, l'interaction entre le stade phénologique et la structure végétative peut modifier l'impact de la sécheresse sur le rendement final (Robelin, 1963; Robins *et al.*, 1953).

Par ailleurs, au moment de l'application du stress hydrique, les cultivars IC27 et HKP étaient au même stade phénologique mais avec des développements végétatifs différents (tableau III.9) (matière sèche aérienne, matière sèche racinaire). Grâce à un système racinaire initialement plus développé, exploitant mieux les réserves en profondeur, IC27 a pu maintenir un poids de limbes verts plus important durant toute la période de déficit hydrique. Conséquemment, il fini avec une masse d'épis et un rendement final supérieurs.

Tableau III.9 : Récapitulatif des résultats (MSa: Matière Sèche aérienne; + : faible ++ moyen +++ fort).

	IC30	IC27	HKP
MSa à la floraison	++	+++	++
Racines à la floraison	+	+++	++
Eau consommée	++	+++	++
MSa à la récolte	+++	++	+
Rendement Grain	+++	++	+
Racines à la récolte	+++	++	+

Ainsi, la structure initiale la plus développée, tant de point de vue de la biomasse aérienne que de la biomasse racinaire, semble pouvoir résister mieux à un déficit hydrique post-floral notamment par le maintien d'une surface photosynthétique plus importante, soutenue par une meilleure exploitation des réserves hydriques de profondeur.

Ces résultats, statistiquement peu significatifs dans la plupart des cas, méritent être confirmés à travers une amélioration de la précision dans les essais futurs. En revanche, la logique cohérente de classement des cultivars trouvée à tous les niveaux (système racinaire, exploitation de réserve de sol, maintien de la surface foliaire verte, croissance des épis, etc.) n'est pas le fait du hasard et mérite plus d'investigation. D'autre part, une diminution globale de biomasse aérienne a été enregistrée au cours du stress. Une hypothèse envisageable est celle d'un détournement de matière sèche vers les racines, hypothèse déjà émise en contre-saison froide 1988. Cependant, l'essai de 1990 a montré chez IC30 un maintien et chez IC27 et HKP une perte significative de biomasse racinaire au cours des 30 jours séparant floraison et récolte. Ici, il faut préciser que la contrainte hydrique a duré 15 jours, après quoi l'irrigation a été rétablie sur les 15 jours suivants. Ainsi la structure du système racinaire à la récolte intègre-t-elle les effets cumulés d'une sécheresse et d'une réhumectation. Si les effets de l'alternance dessiccation-réhumectation sur les racines, ne sont pas encore bien connus, l'action de rhizogénèse suivant une réhumectation a été plusieurs fois soulignée (Vartanian 1981; Picard 1973). Ainsi, dans notre cas, nous mesurons l'influence d'un stress hydrique post-floral de durée limitée, sur la structure finale de la plante, ce qui est d'ailleurs plus conforme à la réalité. Mais pour la réaction même du système racinaire à la contrainte hydrique, elle doit être mesurée de manière dynamique au cours du stress hydrique, en relation avec la partie aérienne. Ceci doit être pris en compte pour les essais futurs.

CONCLUSION GENERALE

Les trois essais (rhizotron, contre-saison froide et contre-saison chaude) nous ont permis de dégager un certain nombre de points importants concernant la réaction du mil face aux stress hydriques de début et de fin de cycle et de formuler des hypothèses.

En phase d'installation (germination-montaison), le stress hydrique stimule une extension verticale du système racinaire avec une colonisation plus importante en profondeur. Aucune différence variétale n'apparaît dans cette réponse au déficit hydrique. En revanche, en situation d'alimentation hydrique satisfaisante, certains cultivars (IC27) colonisent le sol plus profondément que d'autres (HKP, IC30) durant la phase d'installation des cultures. Ceci pourrait conditionner leur comportement face à un déficit hydrique plus tardif.

En phase de remplissage des grains, l'essai de contre-saison 88-89 montre que dans un premier temps le cultivar qui supporte le mieux le stress hydrique est celui qui a la structure initiale la plus développée. En raison d'une consommation en eau importante, soutenue par l'exploitation des horizons profonds, et d'une surface foliaire verte (sources d'assimilats carbonés) supérieure, il maintient mieux la croissance des épis dans les 25 premiers jours. Ensuite, quand le déficit hydrique se prolonge, la faiblesse de la réserve en eau disponible pénalise fortement le rendement final. Cependant, l'essai de contre-saison 1990 révèle aussi un effet déterminant du stade phénologique atteint par la plante lors du déclenchement du déficit hydrique. Indépendamment de leur biomasse aérienne, les plantes ayant le développement phénologique le plus avancé au début du stress sont celles qui maintiennent la plus forte production de grains.

Il existe donc une relation entre la capacité de la plante à maintenir le rendement et celle de son système racinaire à exploiter les horizons profonds lors de la sécheresse. L'extension du système racinaire semble être liée à la structure de la plante avant le stress et notamment à l'importance de la surface foliaire verte. Ceci implique des transferts de matière sèche entre parties aériennes et racines. Or, même en situation de déficit hydrique prolongé (contre-saison 88-89), on constate que l'extraction de l'eau par les racines est loin d'être complète en deçà de 150 cm de profondeur. La croissance des racines en réponse à la sécheresse a donc une limite dans l'espace (capacité de colonisation du sol en profondeur) et dans le temps. Ce dernier point reste particulièrement obscur: il pose le problème de la coordination du développement des différents organes de la plante et de l'interaction entre phénologie et réponse au déficit hydrique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANONYME, 1990. Etude agrophysiologique des mécanismes de résistance du mil à la sécheresse. Rapport Annuel 1990, Institut des Radio-Isotopes, Université de Niamey, 14 p.
- BATCHO, E., DAOUDA, O.S., DO, F., ANNEROSE, D.J.M., KHALFAOUI, J.L., FOFANA, A., LAFFRAY, D., 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 p.
- 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. pp 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. pp 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. pp 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. pp 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. pp 265-280.
- SANI, D.O., 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) n°199: 209-216.
- 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. pp 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.
- THIERY, J.M., 1985. "VOYONS", Programme de Simulation Conversationnelle en Physico-chimie et Agronomie, 156-157.
- 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. pp 203-216.

défini par la profondeur, la distance au poquet, et la valeur σ . Il est donc possible de donner une représentation de l'enracinement par la cartographie en lignes d'isodensité $\sigma = \text{cte}$ dans le plan considéré du profil (utilisation du module de topographie du logiciel SURFER4° (1990) [1] (méthode du Kriging).

Détermination de la masse racinaire sous le poquet

Le principe de calcul de la masse de racines est l'intégration de la densité volumique sur l'ensemble du poquet.

Soit p la profondeur du profil, i.e. la profondeur maximum d'enracinement, pour laquelle $\sigma_p = 0$ (condition aux limites), et soit $d_{1/2}$ la demi-distance inter-poquets: on considère donc le cylindre de base carrée $2d_{1/2} \times 2d_{1/2}$ de longueur p , en remarquant que la limitation à $d_{1/2}$ n'est pas gênante dans la mesure où il y a, en moyenne, autant de racines du poquet considéré au-delà de $d_{1/2}$ que de racines du poquet voisin qui pénètrent dans le profil étudié.

La base carrée est subdivisée en huit octants (fig.2) afin de tenir compte de la dissymétrie due au réseau d'irrigation (2 plans d'étude), et éventuellement de mesures faites sur la bissectrice; dans le cas où il n'y aurait pas de mesure sur cette bissectrice, i.e. celui qui nous intéresse, on prendra comme valeurs les moyennes des mesures sur les deux plans orthogonaux.

L'idée est d'ensuite étudier chaque octant, de le "replier comme un éventail" pour projeter une densité surfacique dans un des trois plans de base. Pour obtenir la masse, il suffira d'intégrer sur le plan de projection, puis de sommer les masses de chaque octant.

Octants centrés sur la ligne d'irrigation. Soit r le rayon des carottes et soit h leur épaisseur.

Soient O , A et B les points de carottage, il faut considérer 3 zones concentriques (fig.3) I, II et III. On pose $A = d(O, A)$ et $B = d(O, B)$. On se propose de calculer le volume associé aux secteurs hachurés.

I: le secteur de la carotte O est de volume $v_1 = 1/8 \pi r^2 h$;

II: sachant que l'aire d'une couronne de rayon moyen R , d'épaisseur e est $\pi [(R+e/2)^2 - (R-e/2)^2] = 2\pi R e$, la surface du secteur centré sur A et d'épaisseur $2r$ est:

$$S_2 = 1/8 \cdot 2\pi A \cdot 2r = 1/2 \pi A r,$$

et le volume v_2 du secteur II est:

$$v_2 = 1/2 \pi A r h;$$

III: de même, $v_3 = 1/2 \pi B r h$ par symétrie algébrique de A et B .

Si m_i est la masse de racines dans chaque volume v_i , $m_i = v_i \sigma_i$ (σ_i densité volumique mesurée), la densité surfacique σ' projetée sur le plan médian de l'octant est alors égale à la masse du secteur sur sa section verticale:

$$I: \sigma_1' = \sigma_1 \frac{1}{8} \pi r^2 h / (r h) = \sigma_1 (\pi r/8);$$

$$II: \sigma_2' = \sigma_2 \frac{1}{2} \pi A r h / (2r h) = \sigma_2 (\pi A/4);$$

$$III: \sigma_3' = \sigma_3 (\pi B/4);$$

On retrouve en fait le résultat que la densité surfacique est égale à la densité volumique multipliée par la longueur de l'arc moyen, et les coefficient correctifs c_i de $\sigma_i' = \sigma_i c_i$ sont:

$$c_1: \text{arc moyen de rayon } r/2: \frac{1}{8} 2\pi r/2 = \pi r/8;$$

$$c_2: \text{arc moyen de rayon } A: \frac{1}{8} 2\pi A = \pi A/4;$$

$$c_3: \text{arc moyen de rayon } B: \pi B/4;$$

Pour trouver la masse totale de racines dans l'octant, il faut intégrer sur la surface S du plan vertical considéré:

$$m_{\text{octant}} = \iint_S \sigma'(x,y) dx dy;$$

le plan étant défini par sa profondeur p et par son rayon R' tel que la surface de l'octant soit identique à celle du triangle isocèle de base définie par la médiatrice entre deux poquets voisins:

$$\pi R'^2/8 = d_{1/2}^2 \operatorname{tg}(2\pi/16),$$

$$R' = d_{1/2} [8/\pi \operatorname{tg}(\pi/8)]^{1/2}.$$

Octants centrés sur la ligne orthogonale à la ligne d'irrigation. Puisque la géométrie est la même, les calculs sont identiques au cas précédent.

Octants diagonaux. Les calculs sont similaires jusqu'au rayon d'intégration R'' qu'il faut calculer:

$$\text{surface(octant diagonal)} + \text{surf. (oct. horizontal)} = \text{surf. (quadrant)},$$

$$\text{surf. (oct. diag.)} = d_{1/2}^2 - d_{1/2}^2 \operatorname{tg}(\pi/8) = \pi R''^2/8,$$

$$\text{donc } R'' = d_{1/2} [8/\pi (1 - \operatorname{tg}(\pi/8))]^{1/2}.$$

Et dans tous les cas $m_{\text{octant}} = \int_0^{R'/''} \int_0^p \sigma'(x,y) dx dy$ obtenue par l'uti-

lisation du module d'intégration du logiciel SURFER4° (1990) [2] sur la "cartographie" de σ' calculée à partir des valeurs σ'_i , déduites des mesures σ_i et des coefficients c_i .

Alors,

$M_{totale} = 2 m_{octant}$ parallèle à la ligne de semis
+2 m_{octant} orthogonal à la ligne de semis
+4 m_{octant} diagonal.

RESULTATS ET DISCUSSION

Représentation de la densité volumique

En considérant que $\sigma=0$ dès que la profondeur dépasse 2m, on a pu représenter les cartes moyennes d'isodensité pour le Mil irrigué et pour le stressé (fig.4 et 5), ce qui nous permet de constater qu'en conditions de stress le Mil recherche l'eau en profondeur, alors que sous irrigation le système racinaire reste en surface.

Calcul des masses racinaires

En prenant $p=200\text{cm}$, $d_1/2=50\text{cm}$, $r=3.75\text{cm}$, $A=25\text{cm}$, et $B=50\text{cm}$, on trouve les coefficients de correction $c_1=1.47\text{cm}$, $c_2=19.64\text{cm}$ et $c_3=39.27\text{cm}$, ainsi que les rayons d'intégration $R'=51.35\text{cm}$ et $R''=61.07\text{cm}$.

Le tab.1 donne les principaux résultats concernant les masses; ceci permet de constater que le Mil stressé développe, à terme, plus de masse racinaire que le Mil irrigué. On s'aperçoit aussi qu'il existe une très forte dissymétrie induite par le réseau d'irrigation: la masse racinaire est regroupée dans la zone où la disponibilité en eau est la plus forte.

CONCLUSION

L'approche du système racinaire du Mil au travers de sa densité volumique est possible: cette variable permet d'appréhender non seulement la distribution spatiale (aspect qualitatif), mais aussi de calculer des masses racinaires aussi bien dans le profil tout entier que dans certains horizons (aspect quantitatif).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] SURFER4°, 1990. Pages 4-1 à 4-102 in SURFER° Version 4, Reference Manual, Golden Software, Inc., 809 14th Street, P.O. Box 281, Golden, Colorado 80402-0281, U.S.A..

[2] SURFER4°, 1990. Pages 8-5 à 8-29 in SURFER° Version 4, Reference Manual, Golden Software, Inc., 809 14th Street, P.O. Box 281, Golden, Colorado 80402-0281, U.S.A..

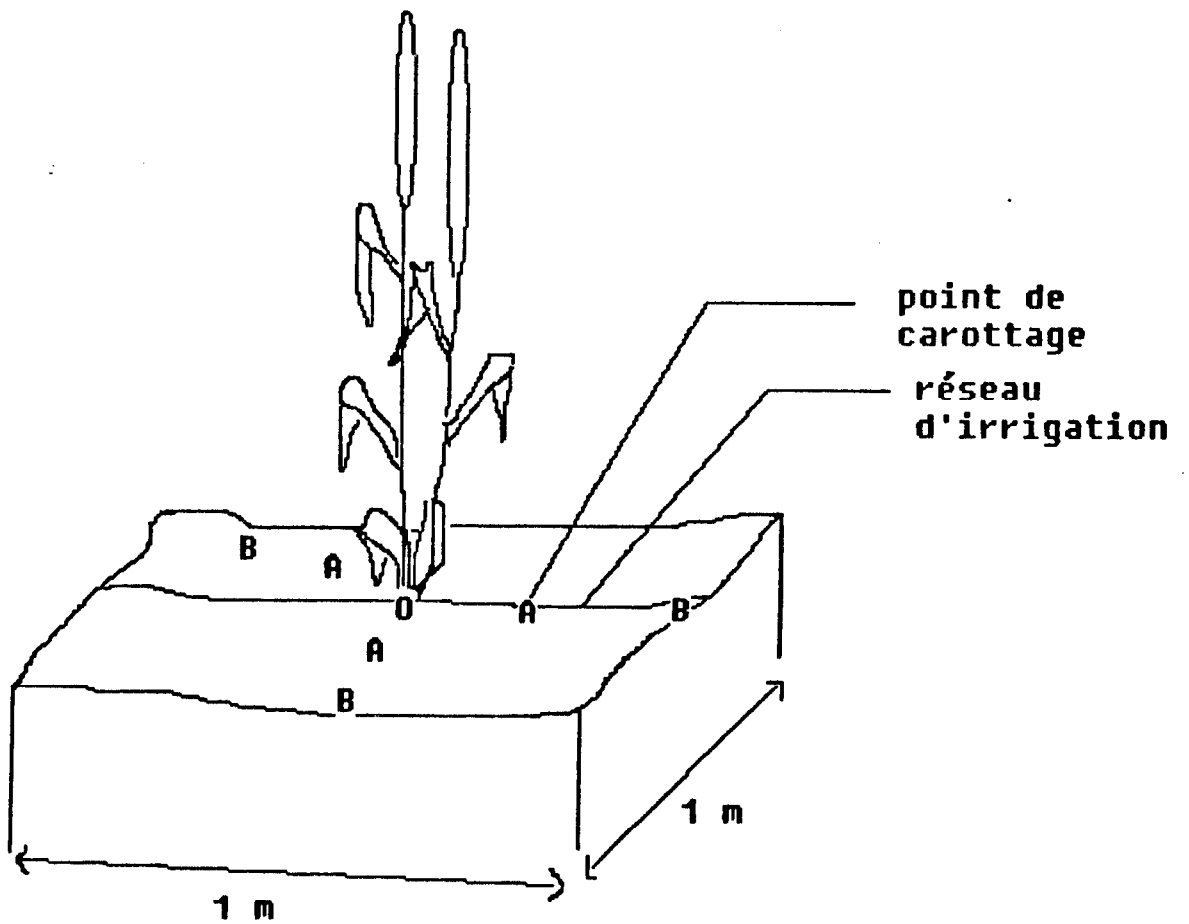


fig. 1. Poquet d'étude

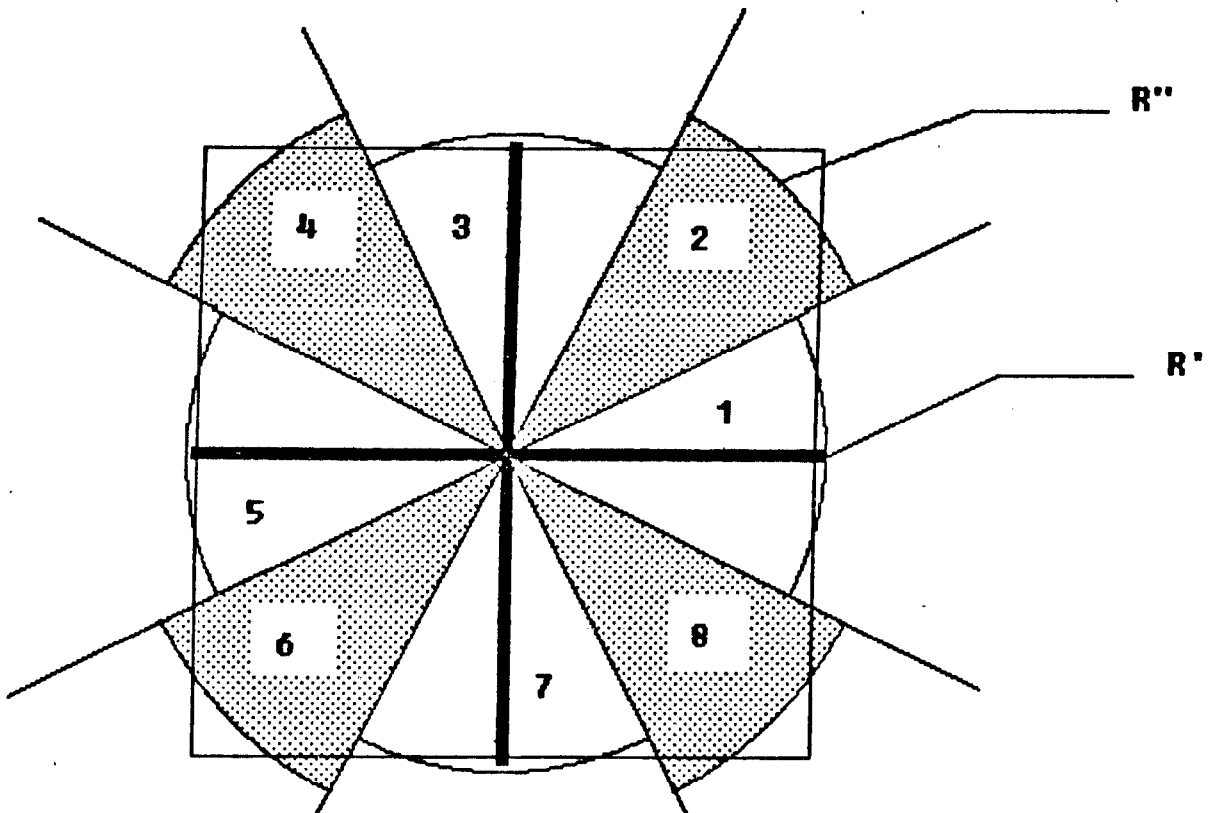


fig. 2. Division de la base carrée du poquet en huit octants

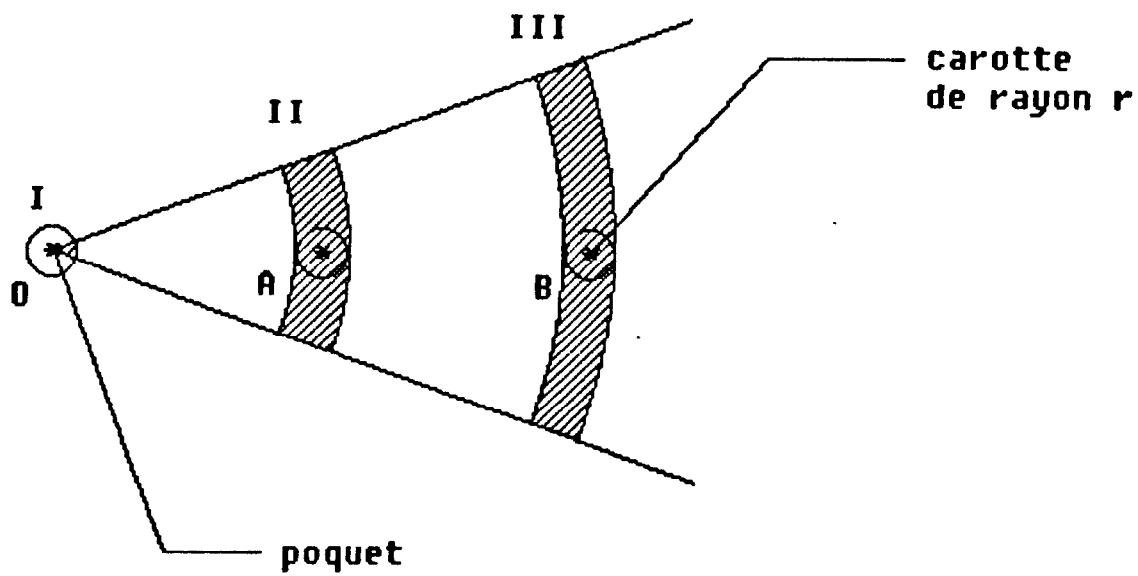


fig. 3. Etude des trois secteurs
sur un octant

fig. 4. DENSITE RACINAIRE IC30 IRRIGUE

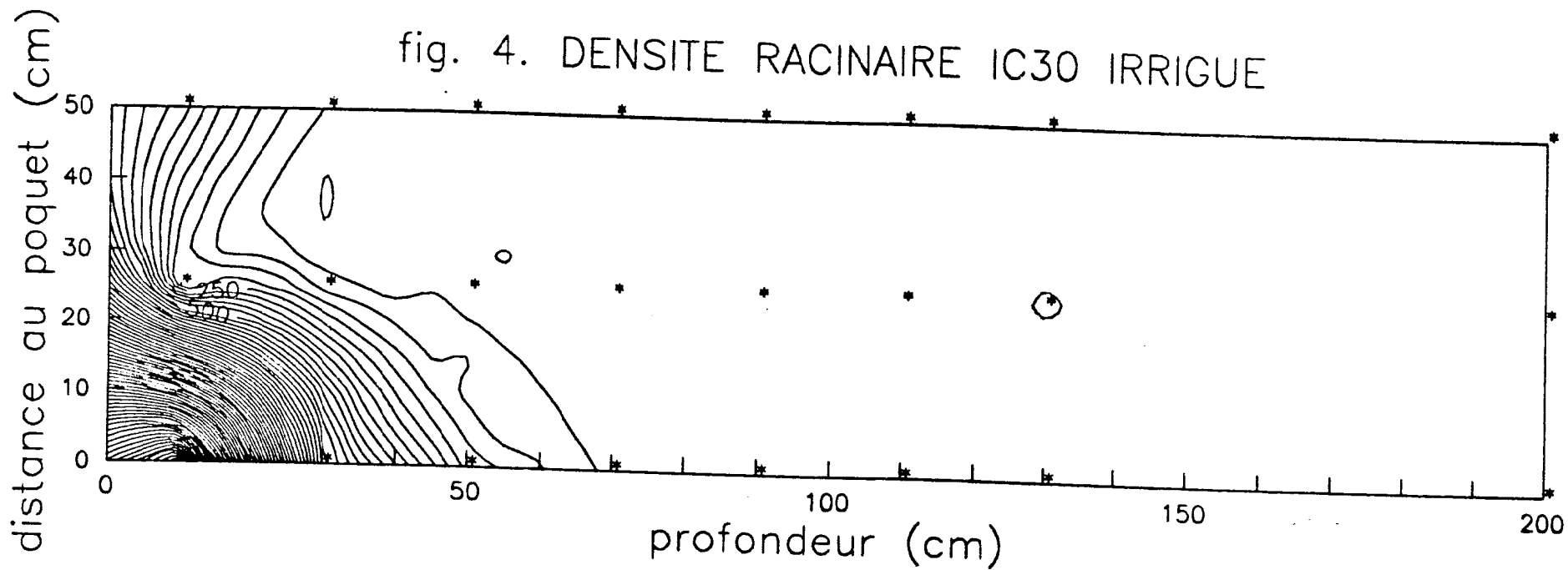
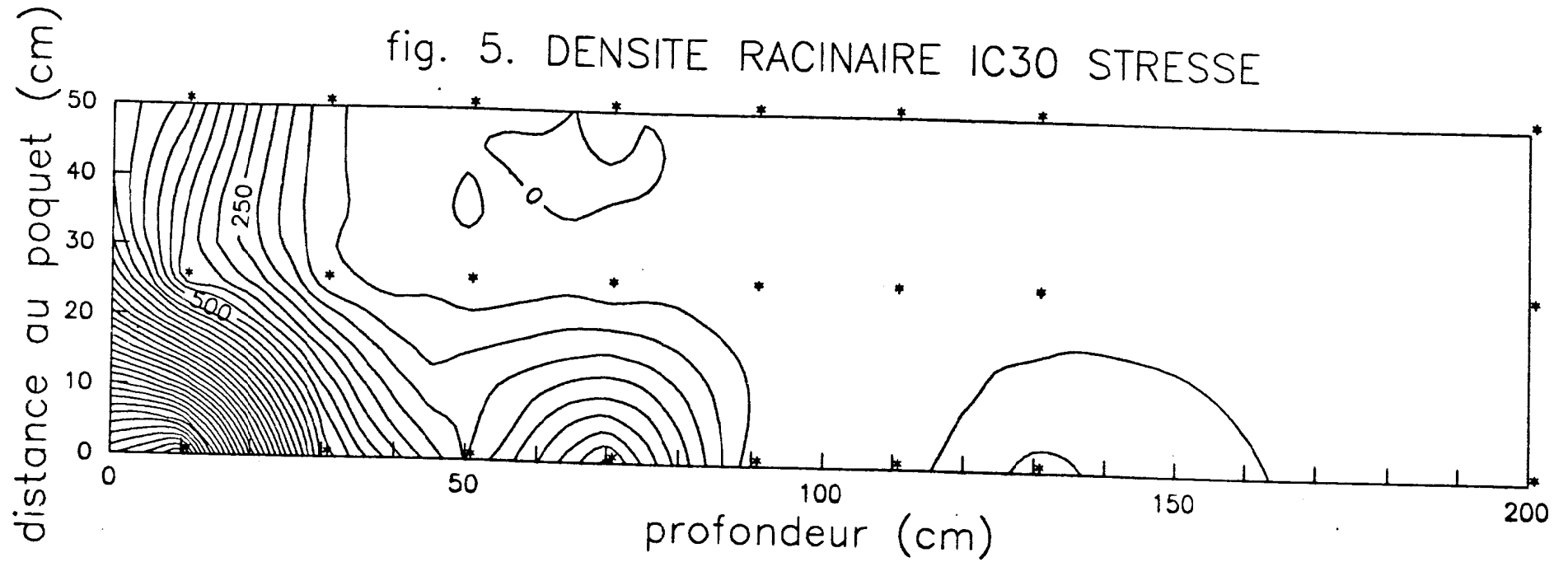
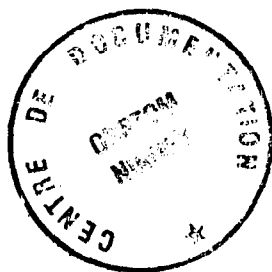


fig. 5. DENSITE RACINAIRE IC30 STRESSE





niveau du facteur	masse octant parallèle à la l. de semis	masse octant orthogonal à la ligne	masse octant diagonal	Masse Totale
stressé	14.7 g	13.2 g	19.5 g	134 g
irrigué	14.1	7.6	15.2	104

Tableau 1. Masses racinaires sous le poquet.