

SR/Doc

JLC/ID
REPUBLIQUE DU SENEGAL
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

SECRETARIAT D'ETAT A LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET
TECHNIQUE

CN0100708
F 612
CHO

DOCUMENT PROVISOIRE

ETUDE DU SYSTEME RACINAIRE DU MIL (*Pennisetum typhoides*)

DANS UN SOL SABLEUX DU SENEGAL

Par

Jean Louis CHOPART*

Juillet 1981

Centre National de Recherches Agronomiques
de Bambey

INSTITUT SENEGALAIS DE RECHERCHES AGRICOLES
(I.S.R.A.)

* Agronome de l'IRAT, mis à la disposition de l'ISRA
-IRAT : 110, me de l'Université, 75340 PARIS CEDEX 07 (France)
-ISRA y BP. 3120 - DAKAR (Sénégal)

ETUDE DU SYSTEME RACINAIRE DU MIL (Pennisetum typhoides)
DANS UN SOL SABLEUX DU SENEGAL

R E S U M E

La morphologie du système racinaire du mil (Var. Souna III) a été étudiée dans un sol sableux profond. On a prélevé des monolithes de sol de un mètre carré de surface de base découpés en tranches de 0,1 mètre jusqu'au front racinaire. Les paramètres racinaires suivants ont été caractérisés à différents stades de végétation : profondeur du front racinaire, poids sec et longueur par unité de volume de sol et par plante, distances moyennes entre les racines, moyenne et écart-type des diamètres des échantillons.

La progression du front racinaire est d'environ 2 cm/jour jusqu'au début du tallage (15 j) puis devient très rapide (3,5 cm/j) entre ce stade et le début de l'épiaison (50 j). En fin de cycle, la vitesse est ralentie ; la profondeur du front est en moyenne de 180 cm. Jusqu'au début du tallage, les valeurs de poids et de longueur sont très faibles puis, jusqu'à l'épiaison, la croissance prend une allure exponentielle. La longueur totale du système racinaire atteint alors 1500 m/m² de surface cultivée sur terrain labouré. A la récolte, la longueur est de 3000 m/m² et le poids de 35 g/m² environ. La plus grande partie de la masse du système racinaire est localisée dans les horizons de surface mais, à partir de l'épiaison, les distances moyennes entre les racines restent cependant inférieures à 6 cm jusqu'à plus de un mètre de profondeur. En fin de cycle, le mil explore bien l'interligne et peut émettre des racines à plus de trois mètres du pied, près de la surface.

Le système racinaire du mil paraît bien adapté au milieu dans lequel il a été étudié. Le labour permet toutefois d'améliorer la vitesse de croissance dans la première moitié du cycle. La biomasse racinaire produite paraît assez faible par rapport à d'autres espèces mais doit cependant avoir une influence non négligeable sur le maintien d'un niveau minimum de matière organique dans les sols sableux cultivés.

Mots clés : Mil - système racinaire : méthodes d'étude, morphologie, croissance - Sénégal - Travail du sol.

Millet (Pennisetum typhoides) root system study
in a Sandy soil of Senegal

Summary

The millet root system morphology has been studied in a deep sandy soil of Senegal. One square meter basis surface soil monoliths have been sampled into 0,1 meter slices down to the root front at different stages of the cycle. Following root parameters have been characterized: depth of root front, dry weight and total length by a soil volume unit and by plant, mean distances between roots, mean and standard-deviation of root diameters.

Root front progression is about 2 cm/day up to the beginning of tillering (15 days after germination stage) then becomes very high (3,5 cm/day) between tillering and the beginning of earing (50 days). At the end of cycle, rate is slackened; root front is then about 180 cm deep. Dry weight and length values are very small up to beginning of tillering, then growth is exponential up to coming into ear. Total root system is then about 1500 m/m² long on a ploughed field. At harvest,

length is 3000 m/m² and dry weight 35 g/m². Most of the root system material is located near the soil surface, but after earing, mean distances between roots are less than 6 cm down to more than one meter soil depth. At the end of cycle, there is a good settlement of the soil between plants by roots which can grow three meters from plant near surface.

Millet root system seems well adapted to the environment where it was studied. Ploughing increases yet root growth in the first half of cycle. Root biomass production is quite low but it may help for the conservation of a minimum level of organic matter in cultivated sandy soils.

S 3 N I L A, I R E

1 - INTRODUCTION

2 - METHODES EXPERIMENTALES

- 21 - La plante et le milieu d'étude
- 22 - Techniques d'étude du système racinaire
 - 221 - Technique de prélèvement
 - 222 - Techniques de caractérisation
 - 223 - Technique d'étude avec le ^{32}P

3 - RESULTATS

- 31 - Croissance en début de cycle
- 32 - Progression du front racinaire
- 33 - Biomasse racinaire
 - 331 - Poids sec total
 - 332 - Rapport entre parties aériennes et racines
 - 333 - Répartition de la masse racinaire dans le profil
- 34 - Colonisation du sol par les racines
 - 341 - Longueur totale
 - 342 - Colonisation du profil de sol
 - 343 - Colonisation de l'interligne
 - 344 - Extension latérale du système racinaire
- 35 - Diamètre et surface des racines

4 - DISCUSSION CONCLUSION

I - INTRODUCTION

Le développement du système racinaire joue un rôle très important dans la nutrition et la productivité d'une culture. Cela paraît particulièrement vrai au Sénégal. En effet, les sols y sont profonds mais pauvres (surtout en phosphore); il existe des risques élevés de lixiviation de certains cations et l'alimentation hydrique des plantes est souvent déficitaire. Dans ces conditions, les réserves en eau et en éléments minéraux réellement disponibles pour la plante dépendent étroitement des possibilités d'extension du système racinaire.

Dans le cadre de l'intensification de l'agriculture, à côté de l'amélioration de la fertilité du sol et de l'augmentation des stocks hydriques, il convient donc de veiller à ce que l'enracinement trouve des conditions favorables à sa croissance et à son fonctionnement.

Cela nécessite au préalable, une bonne connaissance des principales caractéristiques de l'enracinement des plantes cultivées au Sénégal dans leurs conditions naturelles.

Or, la connaissance des systèmes racinaires de ces plantes tropicales est encore très fragmentaire, en particulier pour le mil, qui est l'une des deux principales cultures du Sénégal avec l'arachide.

Certains aspects de la morphologie du système racinaire du mil ont été abordés en Inde, en vases de végétation (30) ou au champ (24, 19), et en Australie (37, 45). Mais il s'agit de variétés dont la morphologie est très différente de celles cultivées au Sénégal.

En Afrique, les travaux ont essentiellement été réalisés au Sénégal, mais il s'agit de cultures en bac de végétation (36) ou en milieu hydroponique pendant les tous premiers jours du cycle (32).

C'est pourquoi il a paru intéressant d'étudier, au champ, la dynamique du système racinaire du mil pour tenter de répondre aux objectifs suivants :

1° - obtenir un "référentiel" afin de pouvoir situer des observations ponctuelles par rapport aux conditions générales de croissance racinaire.

2° - comparer les caractéristiques des systèmes racinaires du mil au Sénégal avec celles d'autres régions.

3° - connaître, aux différents stades de végétation, le volume de sol exploré par les racines (définition des réserves utiles, bilans hydrique et minéral).

4° - mieux appréhender les mécanismes de l'absorption racinaire de l'eau et des éléments minéraux du mil au champ, et les problèmes qui peuvent se poser à ce niveau.

5° - évaluer la biomasse racinaire totale restant dans le sol après la récolte, et sa répartition dans le profil.

6° - faciliter la généralisation des résultats agronomiques grâce à la modélisation et à la simulation. Certains auteurs ont fait état de la possibilité de modéliser les phénomènes d'extraction racinaire de l'eau dans le sol (35, 28, 33, 34, 16, 22,8), et d'autres auteurs proposent des modèles plus globaux, permettant de prévoir l'évolution des profils hydriques sous culture et la consommation en eau des plantes (22, 17, 20). Or, la plupart de ces modèles font intervenir comme paramètres différentes caractéristiques des systèmes racinaires dont il faut connaître les valeurs. Le degré de précision des résultats donnés par les formules dépend, entre autre, de la représentativité des données introduites concernant les racines.

La croissance des systèmes racinaires dans le sol est sous la dépendance de nombreux facteurs du milieu, en particulier des propriétés physiques du sol (porosité et aération, résistance mécanique à la pénétration, état d'humidité, température), et des propriétés chimiques du sol (teneur en éléments nutritifs, toxicité éventuelle de l'aluminium échangeable au d'acides organiques). La croissance des racines dépend aussi, bien sûr, des conditions de développement des parties aériennes. In conséquence, la variabilité du système racinaire d'une même variété peut être très grande.

Il faudrait normalement caractériser, isoler et faire varier chacun de ces principaux facteurs, ce qui est exclu en conditions de plein champ. Afin de diminuer cette variabilité, on a limité le domaine de validité de l'étude en fixant au départ les conditions suivantes :

- sol dior (ferrugineux tropical sableux), humide sur une profondeur supérieure à celle du front racinaire, de $\text{pH} > 5$, ayant bénéficié depuis au moins deux ans d'une fertilisation conforme à celle préconisée par la recherche au Sénégal.

- techniques agronomiques vulgarisées dans la région de Bambey.
- culture pluviale, sans irrigation.

Seul, le travail du sol a fait l'objet d'une étude comparative : les plantes ont été cultivées sans aucun travail du sol comme cela est ac-

tuellement le cas en milieu rural, et avec labour comme le propose la recherche. Bien sûr, les résultats et conclusions ne pourront s'appliquer sensu stricto, qu'aux conditions ainsi définies. Toutefois, ces conditions correspondent généralement à celles de l'expérimentation à Dambey et, si le paysan applique les techniques préconisées, les résultats peuvent aussi intéresser de larges superficies cultivées dans la région centre du Sénégal.

II - METHODES EXPERIMENTALES

21 - La plante et le milieu d'étude

Le mil pénicillaire (Pennisetum typhoides) est une céréale annuelle, cultivée depuis très longtemps en Afrique de l'Ouest. C'est une plante de haute taille et fort tallage. L'épi est en forme de chandelle, les grains sont de très faibles dimensions. Le mil hâtif (Sauna) est de loin le plus répandu.

On a étudié l'enracinement de la variété Sauna III sélectionnée au CNRA de Dambey et actuellement vulgarisée. Le cycle est de 90 jours, la taille est légèrement supérieure à 2 mètres, le tallage est abondant et la floraison débute vers le 60ème jour. Le mil sauna III est généralement semé en poquets espacés de un mètre les uns des autres, puis démarqué entre le 10ème et le 15ème jour pour ne laisser que 3 plantes/poquet.

L'étude a été réalisée au Centre National de Recherches Agronomiques de Dambey (Sénégal) sur un sol ferrugineux tropical peu lessivé, d'après la classification française, et appelé localement Dior. Le sol, profond, relativement homogène est formé sur un matériau sableux quaternaire de 2 à 10 mètres d'épaisseur, il est très sableux, la fraction argileuse (environ 5 %) est essentiellement constituée de kaolinite. Les teneurs en matière organique (0,5 % environ en surface) et en phosphore sont particulièrement faibles. La structure est très peu développée. La densité apparente du sol varie entre 1,55 et 1,62. La perméabilité est élevée : à 13 % d'humidité volumique, la conductivité hydraulique est d'environ 100 mm/jour (21). Le drainage est très bon.

Ru cours les différentes années de l'étude, la pluviométrie à proximité des terrains d'essais a été en moyenne de 500 mm, c'est à dire sensiblement inférieure à la moyenne des 50 dernières années à Dambey (640 mm). Des contrôles de l'humidité du sol ont été effectués régulièrement au cours du cycle, ce qui a permis de suivre les conditions hydriques de la croissance racinaire dans le sol, et éventuellement d'éliminer des prélèvements lorsque

la teneur en eau était trop basse à une certaine profondeur. Les principales autres caractéristiques climatiques ont aussi été mesurées au niveau du poste météorologique de la station de Bamboey : température, radiation solaire. Elles sont globalement représentatives des conditions moyennes publiées par ailleurs (9, 14).

22 - Techniques d'étude du système racinaire :

Il existe de nombreuses méthodes d'étude des systèmes racinaires au champ. Un certain nombre de revues bibliographiques ont été réalisées sur ce sujet (31, 2, 7). Le choix parmi ces méthodes dépend des objectifs de l'étude, de la morphologie de la plante, des caractéristiques du sol et des moyens disponibles. Sauf pour une expérience destinée à déterminer la distance d'extension latérale des racines autour du pied, pour laquelle on a eu recours à une méthode faisant appel aux éléments radioactifs, on a uniquement utilisé des techniques de prélèvements d'échantillons de sol **suivies** d'une extraction des racines et d'une caractérisation de celles-ci.

221 - Technique de prélèvement

Le principe de la méthode choisie consiste à prélever l'ensemble des racines contenues dans un monolithe de sol dont la surface de base est égale à la densité de semis du mil, soit un mètre carré, et dont la profondeur correspond à celle du front racinaire (180 cm à la récolte). Ceci permet donc d'évaluer la production par unité de surface cultivée.

Après avoir dégagé le monolithe grâce à une tranchée, on le découpe en tranches dont l'épaisseur peut être variable en fonction des caractéristiques du profil pédologique. Le sol Dior de Bamboey étant généralement uniformément sableux dans la zone de développement racinaire, les prélèvements ont été réalisés systématiquement par tranches de 13 cm, ce qui facilite l'exploitation des résultats.

Chaque échantillon de terre de 0,1 m³ est porté au laboratoire où l'on procède à l'extraction des racines par lavage sur tamis à mailles carrées de 1 mm. La séparation entre les racines d'une part et les débris de matière organique et les sables grossiers d'autre part, se fait manuellement.

On a étudié le système racinaire du mil à différents stades de végétation de la plante : 0, 15, 20, 24, 30, 37, 50, 65 et 90^{ème} jour, soit

au total 64 prélèvements représentant environ 100 tonnes de terre tamisée. Dans quelques cas, on a subdivisé chaque tranche de sol de 0,1 x 1 x 1 m en 25 sous-échantillons de 0,2 x 0,2 x 0,1 m prélevés séparément, ce qui a permis d'étudier la variation de la densité racinaire en fonction de la distance latérale par rapport au pied.

222 - Techniques de caractérisation :

On a essayé de procéder à une caractérisation des paramètres morphologiques du système racinaire du mil les plus importants en agronomie :

- Le poids de matière sèche par plante, par unité de volume de sol et sa répartition dans le profil

C'est le paramètre le plus couramment utilisé dans les études racinaires. Son intérêt réside essentiellement dans l'étude des rapports de masse entre les parties aériennes et souterraines, ainsi que dans l'évaluation de la restitution au sol de la matière organique ou provenance des racines. On l'obtient facilement par pesée après séchage pendant 24 h à l'étuve à 60°.

- La profondeur du front racinaire :

Ce paramètre permet de déterminer la quantité potentielle d'eau et d'éléments minéraux mis à la disposition de la plante aux différents stades de végétation. On retient pour cela la dernière tranche de sol prélevée qui contient encore des racines.

- La longueur totale des racines par plante ou par volume de sol.

De ce paramètre, on peut tirer la distance moyenne entre les racines, qui apparaît comme un des critères les plus importants pour les études de nutrition en culture de plein champ, car il permet de caractériser le degré réel de colonisation du sol par les racines, et d'évaluer les distances maximales de migration de l'eau et des éléments nutritifs des sites de rétention jusqu'au racines. Plusieurs auteurs ont souligné l'importance (13, 3, 25, 26, 34).

La longueur totale des échantillons de racines a été mesurée grâce à une technique dérivée de la méthode des intersections (29). La modification par rapport à la technique originale consiste en une disposition systématique des lignes d'intersection sur la surface d'étalement, sous forme de grille, afin d'assurer une meilleure répartition des points de comptage de l'échantillon et d'améliorer la rapidité et la facilité de la lecture. Cette méthode est détaillée par ailleurs (11).

La distance moyenne entre les racines dans un échantillon de sol est obtenue par calcul à partir de la longueur de racines par unité de volume de sol (26).

- Le diamètre moyen et l'écart type de la population des diamètres

Ce sont des caractéristiques morphologiques intéressantes car elle permettent de juger de la finesse des racines et de leur degré de ramification. D'autre part, à partir de ces mesures de longueur totale et de diamètre moyen, on peut facilement évaluer la surface développée des racines, donc la surface de contact sol-racines (si l'on ne tient pas compte des poils racinaires).

Un système racinaire de plante herbacée, ou un échantillon représentatif de celui-ci, peut être considéré synthétiquement comme un ensemble de cylindres de longueur unitaire assez faible pour que le diamètre y soit constant.

Le diamètre moyen (\bar{d}) des racines peut dans ces conditions être déduit de leur longueur (L) et de la surface de la coupe diamétrale de celles-ci (S_d) : $\bar{d} = S_d \times L^{-1}$. La valeur de S_d est obtenue à l'aide d'un planimètre photoélectrique électronique, assez largement utilisé pour les mesures de surfaces foliaires et dont le pouvoir de résolution est de 0,1 mm².

L'écart-type d'une population des diamètres de racines (σ) a été évalué, non pas par la mesure directe d'un grand nombre de diamètres, mais indirectement par calcul, à partir de trois mesures globales faciles à obtenir : la longueur totale (L), la surface diamétrale (S_d) et le volume (V) d'un échantillon de racines (27).

$$\sigma = \sqrt{\frac{4V}{\pi} - L\bar{d}^2}$$

Le volume V est obtenu à partir du poids frais des racines et de leur densité. La précision des résultats obtenus pour chacun des paramètres retenus a été étudiée par ailleurs (10, 11).

Les différentes opérations de traitement des échantillons de racines sont réalisées suivant l'ordre indiqué à la figure N° 1. Pour faciliter la mesure de la surface diamétrale et de la longueur, les racines sont préalablement colorées au bleu de méthylène.

223 - Technique d'étude avec le ³²P

Le phosphore radioactif a été utilisé dans une expérience destinée à évaluer la distance maximale d'extension latérale du système racinaire

du mil en fin de cycle. Le principe consista à placer du ^{32}P dans le sol puis au bout d'une semaine à prélever les Touilles sur des pieds situés à différentes distances du point de placement, et dont la plus près se trouve à 25 cm environ du site de placement. On détermine ensuite si elles sont devenues radioactives ou non, c'est-à-dire si les racines de la plante prélevée ont absorbé du ^{32}P à l'endroit où celui-ci a été placé.

Pour marquer un site, on introduit du ^{32}P à 20 cm de profondeur dans trois trous espacés de 10 cm les uns des autres et formant un triangle. Dans chaque trou, on place 2 ml d'une solution contenant $25 \mu\text{Ci}$ de ^{32}P x ml^{-1} et $0,5 \text{ mg}$ x ml^{-1} de P ont raîneur. L'essai comporte six répétitions.

Les plantes prélevées sont situées à différentes distances du site de placement. En moyenne, les distances sont de 25 cm, 110, 140, 200, et 300 cm. On prélève le tiers supérieur de la dernière feuille de chaque talle d'une plante. Après prélèvement, les feuilles sont séchées, broyées, minéralisées. La radioactivité est mesurée par effet CERENKOV au spectromètre à scintillation liquide. On considère que la plante a absorbé du ^{32}P lorsque le résultat du comptage de radioactivité est supérieur de 10 % au comptage le plus élevé obtenu sur 5 répétitions de feuilles non marquées, prélevées à l'extérieur de la parcelle, et traitées dans les mêmes conditions.

III - RESULTATS

31 - Croissance en début de cycle

Lorsque Les graines ont été semées dans un sol sec, la racine séminale apparaît de 24 à 48 heures après la première pluie. Cette racine a un géotropisme positif très prononcé.

Au stade 5 feuilles, c'est-à-dire 9 à 10 jours après le début de la germination, la première racine adventive apparaît au niveau du collet, juste au dessous de la surface du sol. Cette racine va rester dépourvue de racines secondaires pendant plusieurs jours. Très rapidement, d'autres racines vont apparaître au niveau du collet puis des premiers noeuds.

32 - Progression du front racinaire :

L'évolution du front racinaire du mil au cours du cycle de la plante est représentée sur la figure n° 2. Il semble que l'on puisse distinguer trois phases légèrement distinctes.

Jusqu'au quinzième jour, c'est le système séminal qui domine, et la profondeur d'avancement du front n'est que de 1,5 à 2 cm/jour. Le système

racinaire issu des premiers noeuds a une croissance plus rapide.

Les racines nodales dépassent le front racinaire du système sé-
minal vers le quinzième jour, et la vitesse de progression du front raci-
naire atteint presque 3,5 cm/jour jusqu'à la fin de la montaison.

Ensuite, et jusqu'à la récolte, la vitesse de progression en
profondeur diminue assez fortement. A la récolte, le système racinaire
atteint une profondeur située entre 160 et 200 cm, cette cote peut parfois
être légèrement dépassée dans certaines circonstances particulièrement favo-
rables à la croissance en profondeur.

Le labour ne paraît pas avoir d'influence notable sur l'évolution
du front racinaire du mil.

33 . Biomasse racinaire

331 - Poids sec total

Jusqu'au quinzième jour, les poids totaux des parties aériennes
et des racines sont très faibles. Le huitième jour, le poids sec des racines
est de quelques milligrammes par poquet et le poids sec des parties aériennes
n'est guère plus important. Les poids de matière sèche sont très variables
d'un pied à l'autre.

A partir du quinzième jour, la croissance des racines exprimée en
gramme de matière sèche par mètre carré (ou par poquet de 3 pieds) suit une
courbe en S (figure n° 3). Entre 15 et 50 jours, l'évolution du poids sec
des racines s'ajuste à une fonction exponentielle de type $x = x_0 e^{rt}$, avec
r représentant la vitesse de croissance relative :

$$\begin{aligned} \text{Témoïn P} &: 0,0010 e^{0,140 t} \\ n &: 17 \quad r^2 = 0,956 \\ \text{Labour P} &= 0,011 e^{0,163 t} \\ n &= 16 \quad r^2 = 0,939 \end{aligned}$$

La vitesse d'augmentation du poids des racines est donc plus
élevée avec labour qu'en absence de labour. A partir du cinquantième jour
(apparition des premiers épis), la croissance pondérale des racines devient
très faible, avec même une légère diminution du poids de matière sèche re-
cueilli en fin de cycle sur traitement labouré. A la récolte, la différence
entre les deux traitements devient négligeable.

L'évolution du rapport entre le poids sec des parties aériennes et
celui des racines (PA/R) paraît comporter plusieurs phases (figure n° 4) :

une phase d'accroissement entre la levée et le vingt cinquième jour qui correspond à la phase de tallage, une phase de stagnation entre le vingt cinquième jour et le cinquantième jour qui correspond à la période de croissance très rapide de l'enracinement, puis une nouvelle phase d'augmentation entre le cinquantième et le soixante cinquième jour, lorsque l'appareil racinaire a presque atteint son développement maximum, tandis que la poids de matière sèche de l'appareil végétatif continue à croître.

33 - Répartition de la masse racinaire dans le profil

En début de cycle, et pendant la période où la croissance racinaire est très rapide, les profils de densités racinaires sont assez fluctuants et il est difficile d'en tirer un profil type à un stade donné. A partir de la floraison, les profils racinaires sont moins variables. La plus grande partie de la masse racinaire se trouve dans les horizons les plus superficiels (figure n° 5).

Jusqu'à cinquante jours, l'effet du labour se fait sentir sur le poids sec des racines, surtout le profil (tableau n° I). A partir du soixante cinquième jour, lorsque le système racinaire a atteint son développement maximum, le labour a un effet sur la densité racinaire entre 0 et 30 cm et en profondeur à partir de 100 cm.

Tableau n° 1 - Effet du labour sur la densité racinaire dans le profil du sol (en % par rapport au témoin);

Profondeur (cm) :	34 jours	50 jours	entre 65 et 90 jours
0 - 30	+ 125,9 %	+ 102,9 %	+ 34,7 %
30 - 60	+ 172 %	+ 40 %	+ 9,9 %
60 - 100		+ 55,6 %	- 9,5 %
100-180		+ 37,5 %	+ 41,7 %

34 - Colonisation du sol par les racines

341 - Longueur totale du système racinaire

Comme la courbe d'évolution du poids sec total des racines, celle de l'évolution de la longueur totale du système racinaire en fonction du nombre de jours s'ajuste assez bien, entre quinze et cinquante jours, à une fonction exponentielle de type $x = x_0 e^{rt}$.

$$\text{Témoin } L = 0,287e^{0,161t}$$

$$n = 15 \quad r^2 = 0,966$$

$$\text{Labour } L = 0,515e^{0,159t}$$

Si l'on compare les vitesses de croissance relative exprimées en poids de matière sèche et en longueur, on s'aperçoit que les valeurs enregistrées en prenant le critère longueur sont légèrement supérieures au critère poids sec. L'accroissement de la longueur est donc plus rapide que celle du poids sec. Cela est dû, semble-t-il, à une augmentation de la finesse moyenne des racines, ce que confirmera la caractérisation du diamètre moyen.

Entre trente et cinquante jours, on assiste à une phase de croissance très rapide, puisque la longueur totale de racines passe de 50 à 1.500 m/m² de cultures sur labour et de 30 à 1000 m/m² sur t^émo in.

L'effet du labour sur la longueur de l'enracinement se fait sentir dès le début du cycle, plus tôt que sur le poids de matière sèche. Il y aurait donc un effet de la technique sur le degré de finesse des racines.

342 - Colonisation du profil de sol

Les profils racinaires moyens exprimés en m/dm³ et par tranches de sol de dix centimètres apparaissent sur la figure n° 6.

La longueur des racines par unité de volume de sol permet d'apprécier le degré de colonisation de celui-ci. Le calcul de la distance moyenne entre les racines qui découle directement du critère précédent permet d'avoir une évaluation encore plus précise de cette colonisation (fig. n° 7).

Ru trentième jour après semis (tillage), la colonisation du sol encore faible en dessous de 90 cm.

Par contre, dès le cinquantième jour, le système racinaire du mil colonise très bien le sol jusqu'à plus de 100 cm de profondeur, contrairement

4 ce que pourrait laisser croire la répartition du poids de matière sèche des racines (figure n° 5). En effet, en profondeur, les racines plus jeunes ont un pourcentage de matière sèche moins important.

Entre le stade début épiaison et la récolte, la colonisation devient plus lente dans le premier mètre, surtout en présence de labour, tandis qu'en dessous de 120 cm, elle est assez nettement améliorée.

Le début de l'épiaison apparaît donc: comme un point caractéristique dans l'évolution de la colonisation du sol par le système racinaire; c'est le stade où celle-ci a presque atteint son maximum dans les 120 premiers centimètres et permet une très bonne utilisation des réserves hydriques sur cette profondeur, comme cela a d'ailleurs été observé grâce à des suivis de profils hydriques. Or, ce stade correspond au début C c la période où l'incidence d'un stress hydrique sur le rendement est le plus grave.

Grâce à sa bonne colonisation du sol en profondeur au moment de la floraison, la variété de mil étudiée paraît donc bien adaptée à des zones où la pluviométrie est aléatoire mais où les sols sont profonds.

343 - Colonisation de l'interligne

Au stade récolte, on a essayé d'évaluer le gradient de densité racinaire en fonction de la distance par rapport au pied de mil. Les résultats des mesures de poids sec de racines (en g/dm³) et des distances moyennes entre les racines sont présentés dans les figures n° 8 et 9.

Dans les horizons de surface, on note un gradient important du poids sec, du centre du poquet jusqu'à une distance de 30 cm de celui-ci. Par contre, le gradient des distances moyennes entre les racines est beaucoup moins accentué. La différence entre les deux critères est due à la présence, autour du poquet, d'une couronne constituée de racines principales de gros diamètre.

En fin de cycle, et pour des poquets espacés d'un mètre, on peut considérer qu'au delà d'un "bol" situé immédiatement sous le poquet, la colonisation du sol par les racines est assez régulière pour une même profondeur, quelle que soit la distance par rapport au pied ; par conséquent, les possibilités d'utilisation des réserves hydriques et minérales du sol situées au milieu de l'interligne paraissent donc presque aussi bonnes que sous le pied.

334 - Extension latérale du système racinaire

Pour évaluer la distance maximale de croissance latérale des racines, on a utilisé un traceur radioactif le ³²P, placé à 20 cm de profondeur. Les résultats obtenus apparaissent dans le tableau N° II.

Tableau N° II : Extension latérale du système racinaire de mil en fin de cycle évaluée par traceur radioactif (³²P) :

Distance entre le point de placement et le pied prélevé (en cm) :	25	110	140	200	300
Fréquence des réponses positives (prélèvements contenant du ³² P) :	6/6	4/6	6/6	2/6	1/6

En fin de cycle, le mil peut émettre quelques racines jusqu'à plus de trois mètres du pied. Non seulement le système racinaire du mil est pro-

fond, mais son extension latérale est aussi très importante. Il en résulte qu'il peut exister une concurrence active entre différents poquets de mil sur une parcelle mais que, d'autre part, des compensations sont possibles en cas d'hétérogénéité dans les possibilités de fourniture par le sol de l'eau ou des éléments minéraux nécessaires à la plante.

35 - Diamètre et surface des racines

Les résultats des calculs des moyennes et des écart-types des diamètres des échantillons de racines prélevées, figurent dans le tableau n° III.

Tableau n° III : Évolution du diamètre moyen des racines de mil (\bar{d} en mm) et de l'écart type de la population des diamètres (s) en fonction du stade de végétation et de la profondeur :

Profondeur en cm	30 jours (tallage)				50 jours (début épiaison)				90 jours (récolte)			
	Témoin		Labour		Témoin		Labour		Témoin		Labour	
	\bar{d}	s	\bar{d}	s	\bar{d}	s	\bar{d}	s	\bar{d}	s	\bar{d}	s
0 - 20	0,71	0,26	0,61	0,44	0,23	0,30	0,30	11,30	0,21	0,26	0,22	11,34
20 - 43	0,58	0,21	0,45	0,27	0,34	0,24	0,33	0,21	0,26	0,15	0,19	0,25
40 - 60	0,43	0,09	0,45	0,19	0,42	0,12	0,37	0,16	0,21	0,18	0,18	0,23
60 - 80					0,41	0,16	0,41	0,22	0,24	0,20	0,17	0,21
80 - 100					0,43	0,17	0,42	0,20	0,30	0,15	0,24	0,21

Afin de faciliter l'évaluation de la dispersion des diamètres, on a aussi calculé, à partir des valeurs précédentes, les rapports écart-type/diamètre moyen (tableau n° IV) :

Tableau n° IV : Évolution du rapport écart-type/moyenne des diamètres des racines de mil en fonction du stade de végétation et de 13 profondeurs (en cm).

Profondeur (cm)	30 jours (tallage)		50 jours (début épiaison)		90 jours (récolte)	
	Témoin	Labour	Témoin	Labour	Témoin	Labour
0 - 20	0,37	0,72	1,30	1,00	1,24	1,55
20 - 40	0,36	0,60	0,71	0,64	0,58	1,32
40 - 60	0,21	0,42	0,29	0,43	0,86	1,28
60 - 80			0,39	0,54	0,80	1,24
80 - 100			0,40	0,48	0,50	0,88

D'après ces résultats, il apparaît nettement qu'en début de cycle, et jusqu'aux environs du trentième jour, l'enracinement est surtout constitué de grosses racines principales peu ramifiées ; ensuite, entre le trentième et le cinquantième jour, la forte augmentation de la longueur totale des racines correspond surtout à l'émission d'un fin chevelu racinaire à partir de ces racines principales, ce qui a pour effet d'augmenter la dispersion de ces diamètres. Ce processus de ramification paraît se faire d'abord à partir de la surface mais, à la récolte, concerne l'ensemble du profil dans le premier mètre.

A partir des mesures de longueur totale et de diamètre moyen, il est possible de calculer la surface latérale des racines, donc d'évaluer la surface de contact sol-racines en faisant abstraction des poils absorbants. Dans la seconde moitié du cycle, on obtient ainsi pour le mil des valeurs comprises entre 1,5 et 2,0 m² de surface racinaire par poquet

IV - DISCUSSION - CONCLUSION

Les profondeurs maximales d'enracinement citées dans la littérature sont très variables. D'après KANITKAR (24) en Inde, le système racinaire du mil est limité à 120 cm même en sol profond. Ceci ressort aussi d'autres travaux (19) dans le même pays. Par contre, SEGG et al (5) trouvent des racines jusqu'à 360 cm. Finalement, ce sont des résultats obtenus en Australie (27), avec une profondeur maximale de 160 cm, qui se rapprochent le plus de ceux obtenus au Sénégal. Cette caractéristique du système racinaire paraît donc très dépendante des conditions de milieu et des variétés.

Les données bibliographiques sur la production des racines en poids sec ou en longueur sont très rares et difficilement comparables à cause des techniques de prélèvement différentes. Toutefois, des résultats obtenus en Inde (19) se rapprochent assez sensiblement de ceux obtenus au Sénégal pour ce qui est de la dynamique de la croissance pondérale du système racinaire.

- Comparaison avec les systèmes racinaires des autres espèces annuelles cultivées au Sénégal (11-12)

Parmi les quatre principales espèces cultivées au Sénégal, mil, sorgho, riz pluvial, arachide, le mil est celle dont le système racinaire est le plus profond et le mieux développé en profondeur. Par contre, le poids de matière sèche de racines par unité de surface cultivée est plus faible que chez les autres céréales et comparable à celui de l'arachide. Les cultures de sorgho et de riz pluvial colonisent mieux le profil dans les

horizons de surface jusqu'à 20 à 30 cm de profondeur, mais nettement moins bien en dessous.

- Effet du labour sur le système racinaire du mil :

Le labour ne paraît pas avoir d'influence marquée sur la vitesse de progression du front racinaire. En ce qui concerne le poids total de matière sèche et la longueur totale des racines par pied, on observe que les valeurs de ces paramètres, après avoir été peu différentes pendant la phase de la levée, deviennent pendant le tallage très supérieures en présence de labour ; cette technique peut alors doubler le poids et la longueur. Pendant cette période, la vitesse de croissance est donc nettement plus rapide avec labour. A la floraison, les différences sont encore importantes ; la colonisation est améliorée sur l'ensemble du profil. Par contre, à la récolte, les différences deviennent négligeables, sauf en profondeur.

- Adaptation du système racinaire à l'utilisation de l'eau et des éléments minéraux du sol :

Au Sénégal, en conditions de culture de plein champ, deux caractéristiques du système racinaire paraissent influencer fortement les possibilités d'approvisionnement en eau de la plante : la vitesse de progression du front racinaire et le degré de colonisation du sol par les racines.

- Vitesse de progression du front racinaire :

Une vitesse rapide de progression du front racinaire en début de cycle permet à la plante de dépasser au plus tôt la couche de sol la plus soumise à l'évaporation entre deux pluies. Cette caractéristique est aussi importante par la suite, car le front racinaire règle la profondeur et donc le volume du réservoir d'eau utile.

- Le degré de colonisation du sol ;

Le pouvoir réel d'extraction de l'eau à différents niveaux dans le sol dépend de la colonisation de ceux-ci par le système racinaire, c'est à dire des distances entre les racines (26). La seule présence de quelques racines dans une couche de sol est donc insuffisante. C'est le degré de colonisation du sol par les racines qui correspond le mieux aux possibilités réelles d'utilisation des réserves potentielles.

Pour assurer une bonne alimentation de la plante en phosphore et aussi en potassium, le système racinaire devra coloniser rapidement le profil de sol dans les horizons les mieux pourvus en ses éléments, c'est-à-dire dans les horizons de surface. Ceci correspondrait donc à une répartition légèrement différente de celle souhaitée pour l'alimentation hydrique.

Cependant, la disponibilité des éléments minéraux et la possibilité d'extraction de ceux-ci par la plante dépendent étroitement de l'humidité du sol et des flux d'eau dans le sol et les racines. Or, dans les conditions de culture pluviale au Sénégal, les horizons de surface se trouvent souvent à des humidités faibles entre les pluies ; l'alimentation minérale doit alors se faire dans les horizons plus profonds restés humides.

Finalement, le profil racinaire idéal pour l'alimentation minérale des cultures pluviales au Sénégal rejoint le profil idéal pour l'alimentation hydrique, c'est-à-dire essentiellement :

- vitesse rapide d'avancement du front racinaire et profondeur maximale de l'enracinement **importante** atteinte au moment où les besoins en eau deviennent élevés ;
- colonisation rapide et intense par les racines de l'ensemble du profil de sol, aussi bien au surface qu'en profondeur.

Dans quelle mesure le système racinaire du mil se rapproche-t-il du profil racinaire idéal pour les sols sableux du Sénégal ?

Pendant les vingt premiers jours du cycle, le front racinaire reste superficiel mais, du fait des très grands écartements entre pequets, les besoins de la culture sont faibles et les valeurs d'ETM mesurées représentent surtout l'évaporation sol nu (15).

Lorsque les besoins en eau commencent à devenir importants, vers le trentième jour, le front racinaire est déjà à 80 cm, mais la colonisation du profil est encore faible. La plante paraît alors assez dépendante d'un approvisionnement régulier en eau. A partir du cinquantième jour, c'est-à-dire, à l'approche de l'épiaison et au début de la phase la plus sensible à un stress hydrique, le système racinaire colonise bien le sol sur un mètre de profondeur, et peut facilement utiliser les réserves hydriques stockées au dessus de cette cote, surtout si le sol a été labouré.

Le front racinaire va ensuite continuer à progresser jusqu'à la fin du cycle pour atteindre 180 cm, avec une très nette amélioration de la colonisation des horizons profonds entre 100 et 140 cm. La réserve d'eau utile est alors importante.

Le mil paraît donc se rapprocher du profil idéal, particulièrement en fin de cycle. Il serait néanmoins souhaitable d'augmenter, par le travail du sol et éventuellement par la sélection variétale, la vitesse de croissance en début de cycle et la colonisation du sol en profondeur au moment où les besoins en eau commencent à devenir importants (début montaison).

- apport au sol de matière organique en provenance des racines :

À la récolte des parties aériennes, la masse de matière organique provenant du système racinaire du mil qui reste dans le sol, est de 350 à 400 kg/ha. On obtient des résultats comparables après une culture d'arachide (11). Il s'agit là des masses racinaires mesurées en fin de cycle. Les valeurs réelles d'apport de matière organique sont plus importantes par suite de la dégénérescence d'une partie du système racinaire en cours de végétation. La production réelle de biomasse racinaire au cours du cycle de la plante pourrait être supérieure de 30 à 50 % par rapport au poids obtenu à la récolte, d'après des évaluations en phytotron et à l'aide de C^{14} (1).

Les restitutions organiques en provenance des racines de mil paraissent assez faibles, mais elles sont loin d'être négligeables. Au Sénégal, en sol sableux, les quantités de matière organique apportées annuellement par les résidus racinaires de mil (et arachide) représentent ainsi de 5 à 8 % de la matière organique totale du sol. Cette matière organique est très intimement liée au substrat.

D'une manière générale, dans les sols considérés, la vitesse d'évolution des résidus végétaux est rapide. Toutefois, pour les racines, cette évolution est plus lente que celle des pailles enfouies (18). De plus, la fixation biologique de l'azote paraît être plus importante lorsqu'elle se fait au dépend du carbone des résidus racinaires que de celui de pailles de mil ou d'arachide (18).

Pour les terrains sableux du Sénégal dans lesquels on n'apporte souvent aucune autre forme d'enrichissement, les résidus racinaires ont donc une incidence certaine sur le statut organique du sol. Il serait intéressant de préciser cette action et d'en tenir compte dans le bilan organique.

Les techniques utilisées ont permis d'avoir une meilleure connaissance du système racinaire du mil alors que celle-ci était encore très fragmentaire. Il est maintenant possible d'évaluer avec plus de précision les réserves en eau utile qui dépendent du développement des systèmes racinaires, et donc de calculer, ou de simuler, le bilan hydrique dans de meilleures conditions. On doit aussi pouvoir obtenir une valeur approchée du volume de sol réellement utilisable pour l'alimentation de la plante en chacun des principaux éléments nutritifs, en tenant compte des distances de migration dans la sol qui leur sont propres. La détermination du poids de matière sèche de racines à la récolte permet d'avoir une estimation plus précise de l'apport de matière organique que représentent les organes souterrains. Le rôle bénéfique du travail du sol sur le système racinaire du mil se confirme.

Les résultats obtenus ne peuvent cependant s'appliquer qu'à la variété de mil étudiée, cultivée dans les conditions pédo-climatiques définies précédemment.

Il reste encore à étudier plus complètement les variations de croissance racinaire du mil en fonction du type de milieu et de certaines conditions comme l'humidité et le pH du sol. Il faudrait aussi pouvoir comparer la morphologie des systèmes racinaires de différentes variétés en cours de sélection.

Enfin, l'étude du fonctionnement du système racinaire en conditions de plein champ, très intéressante pour expliquer le comportement de la plante mais délicate, commence actuellement à être abordée au Sénégal grâce aux traceurs radioactifs.

- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -

- 1 - ALLARD J.L., 1980 - Estimation de la production en produits photosynthétiques de racines dans le sol sous l'influence de différents facteurs écologiques. Thèse Université de Bonn 134 p. (en allemand).
- 2 - BALDY C., 1973 - Progrès récents concernant l'étude du système racinaire du blé (Triticum sp). Ann Agron., 24-2, 241-276.
- 3 - BARLEY K.P., 1970 - The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. Adv. agron., 22, 159-301.
- 4 - BEGG J.E., 1965 - The growth and development of a crop of bulrush millet (Pennisetum typhoides) J. agric. Sci., 65, 341-344.
- 5 - BEGG J.E., BIERHIZEN J.F., LEMON E.R., MISRA D.K., SLATYER R.O. et STERN W.R., 1964 - Diurnal energy and water exchanges in bulrush millet in a area of high solar radiation. Agric. meteorol., 1294-1312.
- 6 - BLANCHET R., BOSCH H., HAERTENS C., PUECH J. - Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption des éléments minéraux par les cultures. Influence de l'humidité du sol et des flux hydriques sur l'absorption des éléments minéraux par les racines. An. Agron. 25-5, 681-696.
- 7 - BOHM W., 1979 - Methods of studying root systems. Springer verlag edit. N.York.
- 8 - BUSSCHER W.J. et FRITTON D.D., 1978 - Simulated flow through the root xylem. Soil Sci., 125-1, 2-6.
- 9 - CHARREAU c. et NICOU il., 1971 - L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest africaine et ses incidence agronomiques Agron. trop., 26, 209-225, 531-565. 903-973, 1103-1247.
- 10 - CHOPART J.L., 1977 - Caractérisation de certains paramètres morphologiques de systèmes racinaires à partir d'échantillons représentatifs. Doc mult. INRA Toulouse et IRAT Montpellier 82 p.
- 11 - CHOPART J.L., 1980 - Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (Arachide-mil-sorgho-riz pluvial). Thèse do doctorat INP Toulouse 162 p.
- 12 - CHOPART J.L. et NICOU R., 1976 - Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal - Conséquence sur leur alimentation hydrique. Agron. trop., 20, 7-28.

- 13 - COWAN I.R., 1965 - Transport of water in the soil-plant atmosphere system Appl. ecol., 2, 221-239.
- 14 - DANCETTE C., 1976 - Mesures d'évaporation potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Agron. Trop., 31, 321-338.
- 15 - DANCETTE C., 1979 - Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau en zone soudano-sahélienne. Agron. Trop., 34-4, 331-355.
- 16 - FEDDES R.A., KOWALIK P., KOLINSKAMALINKA K. et ZARADNY H., 1976 - Simulation of field water uptake by plant using a soil water dependant root extraction function. J. Hydrol., 31, 13-26.
- 17 - FRANQUIN P. et FOREST F., 1977 - Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. Agron. Trop., 32, 7-11.
- 18 - GANRY F., 1977 - Étude en microlysimètres de la décomposition de plusieurs types de résidus de récolte dans un sol tropical sableux. Agron. Trop., 32-1, 51-65.
- 19 - GREGORY P.J. et SQUIRE G.R., 1979 - Irrigation effects on roots and shoots of pearl millet (Pennisetum typhoides). Expl. agric., 15, 161-168.
- 20 - HALL A.E. et DANCETTE C. 1978 - Analysis of fallow farming system in Semi Arid Africa using a model to simulate the hydrologic budget. Agron. J., 70, 816-823.
- 21 - HANON G. 1978 - Caractérisation hydrodynamique in situ de ciex sols de la région Centre Nord du Sénégal. Doc. mult. ISRA-ONRA DAINBEY (Sénégal) 27 p.
- 22 - HILLEL D. et TALPAZ N., 1976 - Simulation of root growth and its effect on the pattern of soil uptake by a nonuniform root system. Soil Sci., 121-5, 307-312.
- 23 - HILLEL D. TALPAZ N. et VAN KEULEN N., 1976 - A macroscopic scale model of water uptake by a nonuniform root system and water and salt movement in the soil profile. Soil Sci., 121, 242-245.
- 24 - KANITKAR N.V., 1944 - Dry farming in India. Sci. Mon. Imp. Council Agric. Res., 15, 352.
- 25 - MAERTENS C., 1979 - The importance of rooting in the nutrition of crops. In "The soil root interface". Academic press ed. New York 428 p.

- 26 - MAERTENS C, BLANCHET R. et PUECH J., 1974 - Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la culture 1) régimes hydriques, systèmes racinaires et modalités d'alimentation en eau. Ann. Agron., 25, 575-586.
- 27 - MAERTENS C. et CHOPART J.L., 1977 - Caractérisation synthétique de l'enracinement de végétaux herbacés à partir d'échantillons aliquotes du système racinaire. C.R. Acad. Sci., Sér., D : Sci. nat., 28, 1285-1287.
- 28 - HOLZ F.J. et REINSON I., 1970 - Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. Water Resour. Res., 6, 1346-1356.
- 29 - NEWMAN E.I., 1966 - A Method of estimating the total length of root in a sample. J. appl. ecol., 3, 139-145.
- 30 - RATNASWAMI H.L., 1960 - Studies in cereals structure in relation to drought resistance. Madeas agric. J., 181-196.
- 31 - SCHUURMAN D.T., et GOEDEWAGEN M.A.J., 1965 - Methods for examination of root systems and roots. Center for agric. pull. and doc. ed. Wageningen, 85 p.
- 32 - SIBAND P., 1979 - Evolution pondérale du système grain-plantule chez le mil (Pennisetum typhoides) au cours de l'épuisement du grain. Agron. Trop., 34, 250-253.
- 33 - TAYLOR H.B. et KLEPPER B., 1978 - Water uptake by cotton root systems : an examination of assumptions in the single root model. Soil Sci., 120, 57-67.
- 34 - TAYLOR H.B. et KLEPPER B., 1978 - The role of rooting characteristics in the supply of water to plants. Adv. agron., 19-128
- 35 - VAN BAVEL C.H.G., STRIK G. et BRUST K., 1968 - Hydraulic conductivity properties of a clay loam soil and the field mesure of water uptake by roots. Soil Sci. Soc. am. proc., 32, 310-317.
- 36 - VIDAL P., 1963 - Croissance et nutrition minérale ries mil (Pennisetum) cultivés au Sénégal. Theso ing. doct. Université de Dakar, 88 p.
- 37 - WETSELAAR R. et NORMAN H.J.T., 1960 - Recovery of available soil nitrogen by annual fodder at Katherine Northern territory. Aust. J. agric. res., 11, 693.

LEGENDES DES FIGURES

- Fig. N° 1 : Organigramme des opérations de traitement d'un échantillon de racines.
- Fig. N° 2 : Progression du front racinaire
- Fig. N° 3 : Poids sec total des racines avec 1 poquet de 3 plantes par m²
- Fig. N° 4 : Rapport entre le poids sec des parties aériennes et celui des racines
- Fig. N° 5 : Profils de masses racinaires à la floraison et à la récolte
- Fig. N° 6 : Profils des longueurs racinaires à trois stades de végétation
- Fig. N° 7 : Profils de distances moyennes entre les racines à trois stades de végétation
- Fig. N° 8 : Variation de la densité racinaire (g/dm²) en fonction de la distance par rapport au pied (stade récolte)
- Fig. N° 9 : Variation des distances moyennes entre les racines en fonction de la distance par rapport au pied (stade récolte).

TRAITEMENT DE L'ECHANTILLON

PARAMETRES CARACTERISES :

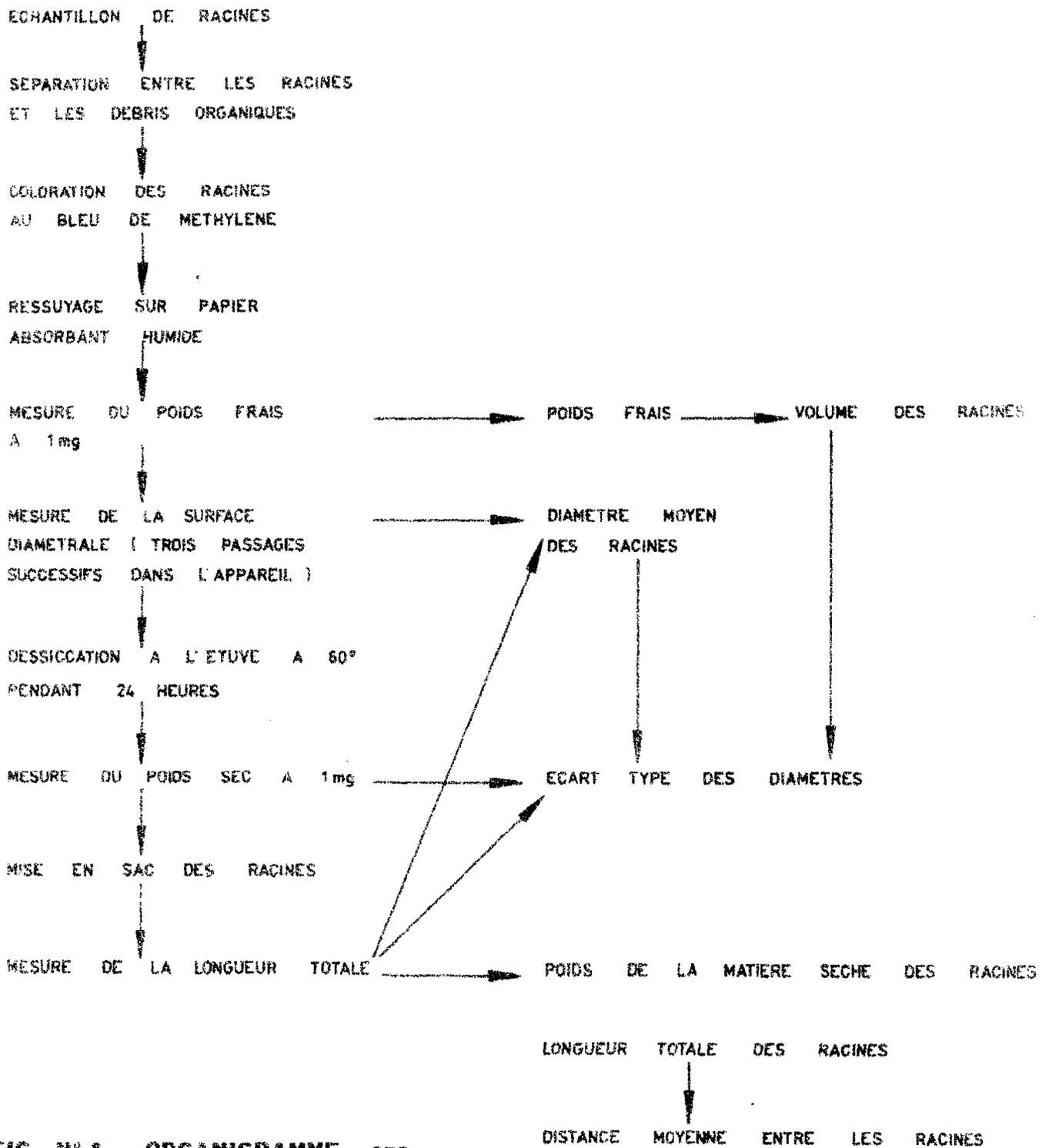


FIG. N° 1 : ORGANIGRAMME DES OPERATIONS DE TRAITEMENT D' UN ECHANTILLON DE RACINES

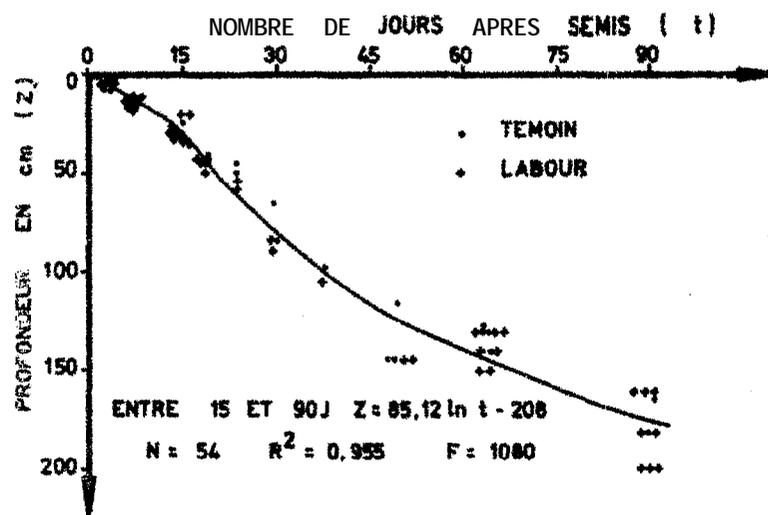


FIG. N° 2 : EVOLUTION DU FRONT RACINAIRE

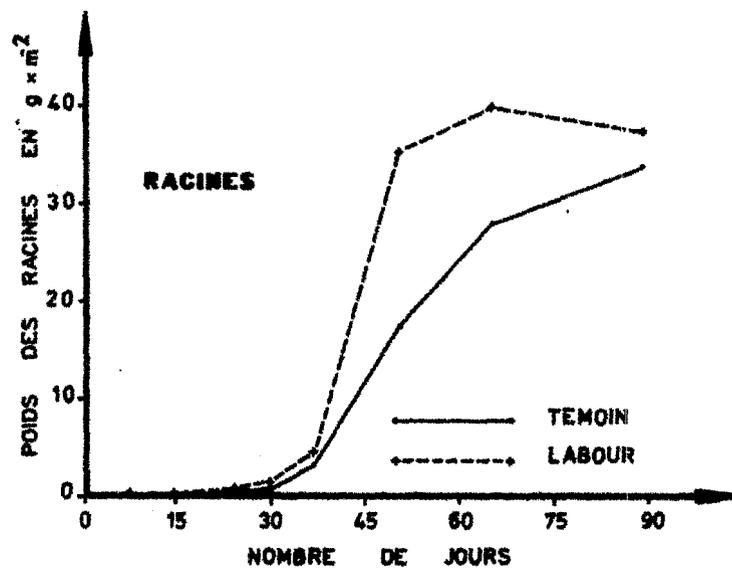
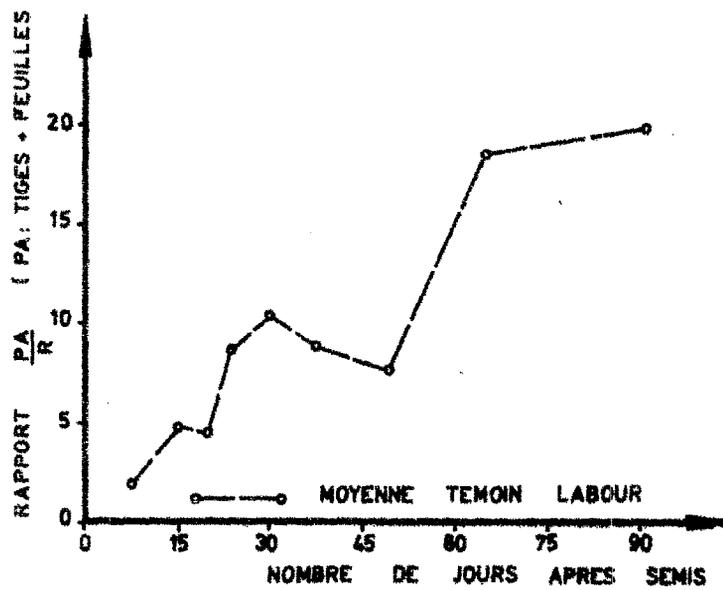
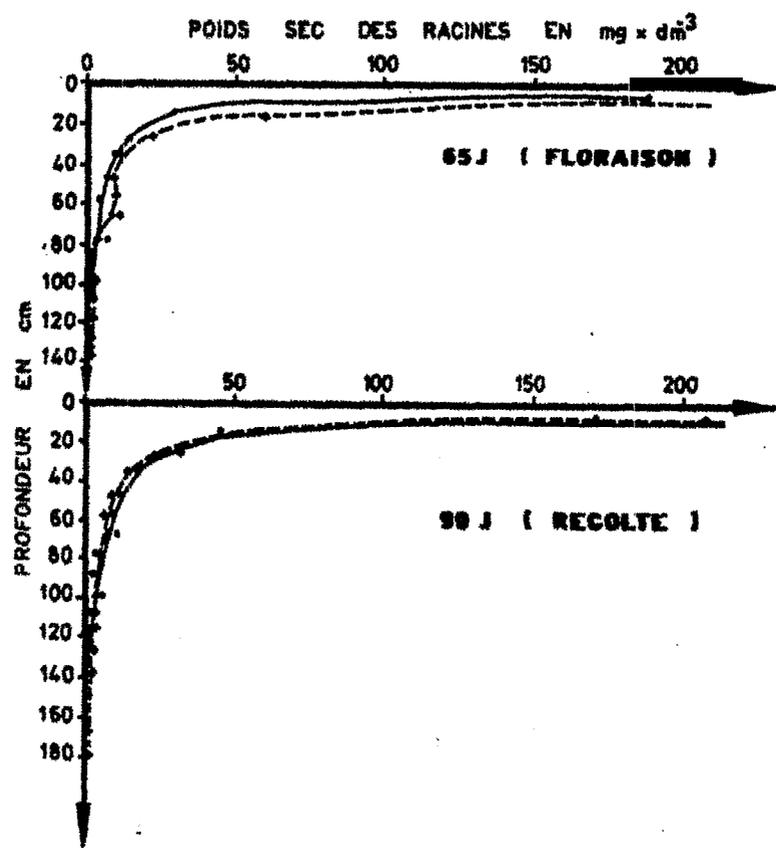


FIG. N° 3 : EVOLUTION DU POIDS SEC TOTAL DES RACINES AVEC 1 POQUET DE 3 PLANTES PAR m²



**FIG. N° 4 : EVOLUTION DU RAP-
PORT ENTRE LE POIDS SEC DES
PARTIES AERIENNES ET CELUI
DES RACINES**



**FIG. N° 5 : PROFILS DE MASSES
RACINAIRES A L A FLORAISON
ET L A RECOLTE**

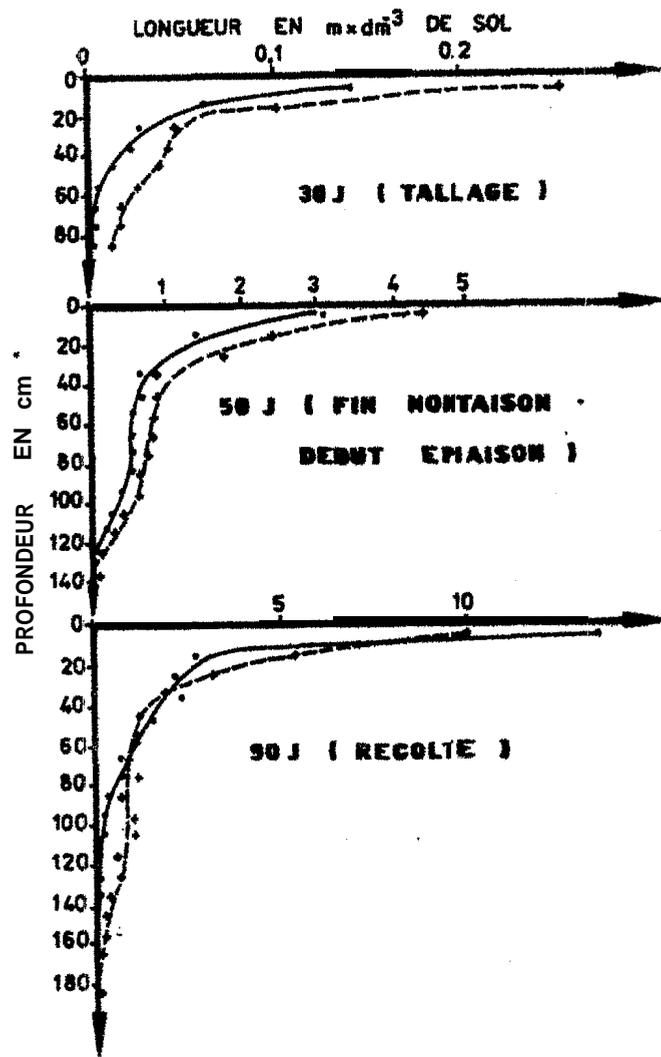


FIG. N° 6 : PROFILS DES LONGUEURS RACINAIRES A TROIS STADES DE VEGETATION

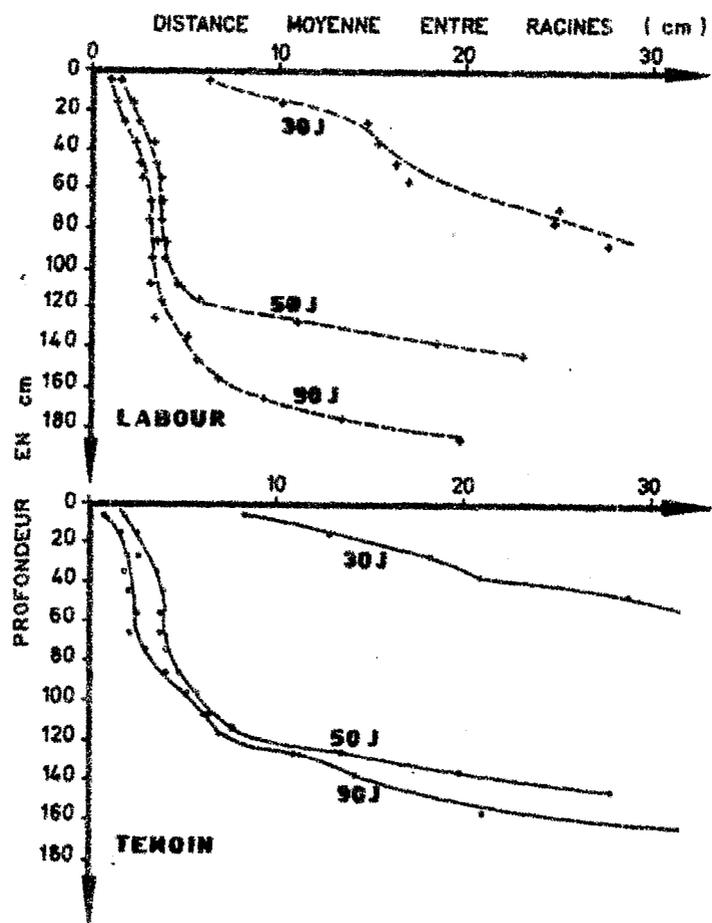


FIG. N° 7 : PROFILS DE DISTANCES MOYENNES ENTRE LES RACINES A TROIS STADES DE VEGETATION

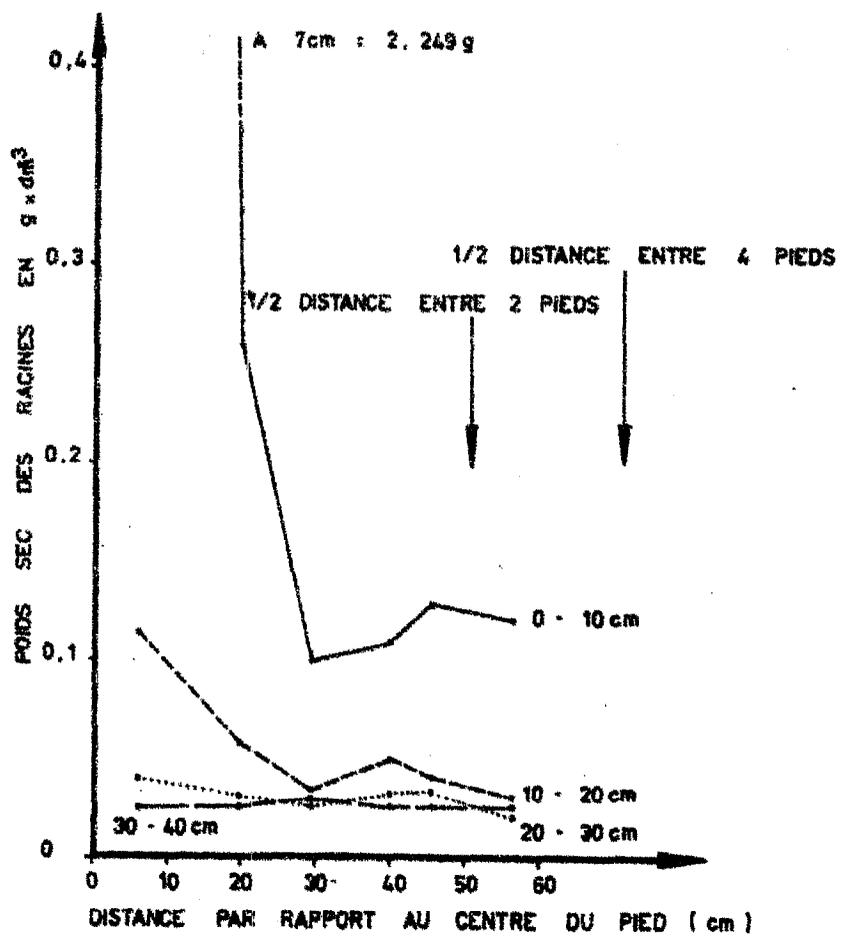


FIG. N° 8 : VARIATION DE LA DENSITE RACINAIRE ($g \times dm^2$) EN FONCTION DE LA DISTANCE PAR RAPPORT AU PIED (STADE RECOLTE)

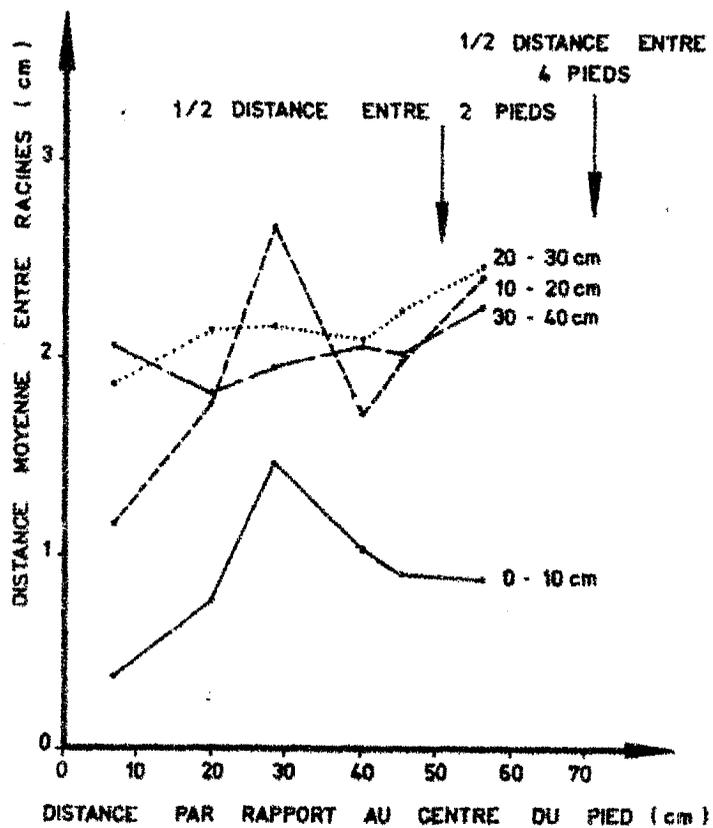


FIG. N° 9 : VARIATION DES DISTANCES MOYENNES ENTRE LES RACINES EN FONCTION DE LA DISTANCE PAR RAPPORT AU PIED (STADE RECOLTE)