

THÈSE

PRESENTÉE A L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

(SPECIALITE : PRODUCTIONS VEGETALES ET
QUALITE DES PRODUITS)

PAR

JEAN LOUIS **CHOPART**

ETUDE AU CHAMP DES SYSTEMES RACINAIRES DES
PRINCIPALES CULTURES PLUVIALES AU SENEGAL
(ARACHIDE - MIL - SORGHO - RIZ PLUVIAL)

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE
LE 22/09/80
C. 120/00
S.H.

SOUTENUE LE 19 JUIN 1980 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

- MELLE **BERDUCOU J.**, PROFESSEUR A L'INP PRES 1 DENT
- Mr **MORARD P.**, PROFESSEUR A L'INP
- Mr **MAERTENS C.**, MAITRE DE RECHERCHES (I N R A) MEMBRE:S
- Mr **NICOU R.**, CHEF DU SERVICE PHYSIQUE DES SOLS A L'INP

SYMBOLES ET ABREVIATIONS UTILISES • DEFINITIONS

SYMBOLES ET ABREVIATIONS :

D	:	Distance moyenne entre les racines (en cm)
d	:	Diamètre d'une racine (en mm)
\bar{d}	:	Diamètre moyen d'un échantillon de racines (en mm)
eq	:	Ecart quadratique statistique
L	:	Longueur totale de racines (en m)
N	:	Nombre de racines
n	:	Nombre d'échantillons
P	:	Poids sec total des racines (en g)
PA/R	:	Rapport entre Le poids sec des parties aériennes (tiges + feuilles) et le poids sec total des racines
r	:	Coefficient de corrélation
r^2	:	Coefficient de détermination
s	:	Ecart type statistique
Sd	:	Surface diamétrale des racines en cm^2
t	:	Nombre de jours après Le semis
v	:	Volume des racines en cm^3
Z	:	Cote par rapport à la surface du sol (en cm)

DEFINITIONS :

L'ensemble des racines d'une plante a été dénommé "système racinaire" ou "enracinement". Il aurait été plus juste de parler de "système radical" (radical: qui appartient à la racine d'un végétal, nait du collet, d'après Le petit Robert - qui appartient à la racine, d'après le petit Robert Larousse).

Cependant, à La suite de plusieurs auteurs, nous avons préféré utiliser Les Premiers termes, plus aisément compréhensibles.

PRESIDENT D'HONNEUR

M. le Professeur ESCANDE
Membre de l'Institut

PRESIDENT

M. le Professeur MONTEL

VICE-PRESIDENTS

M. CONSTANT	Professeur
M. ENJALBERT	Professeur
M. MARTY	Professeur
M. ANDRE	Maître-Assistant

Directeur de l'E.N.S.A.T.	M. le Professeur RAYNAUD
Directeur de l'E.N.S.C.T.	M. le Professeur LATTES
Directeur de l'E.N.S.E.E.I.H.T.	M. l'Ingénieur Principal de l'Armement CRESTIN
Directeur de l'I.G.C.	M. le Professeur GARDY

SECRETAIRE GENERAL

M. CRAMPES

PROFESSEURS HONORAIRES

M. BIREBENT
M. ESCANDE - Membre de l'Institut
M. DIEHL
M. HAMANT

PROFESSEURS

M. ALBKRTINI	Cytologie et pathologie végétales
M. ANGELINO	Génie Chimique
M. BAJON	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. BAUDRAND	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. BELLET	Mécanique - Hydraulique
Melle BERDUCOIJ	Physiologie végétale appliquée
M. BOURGEAT	Pédologie
M. BRUEL	Informatique
M. BUGAREL	Génie Chimique
M. BUIS	Biologie quantitative
M. CALMON	Chimie agricole
M. CANDAU	Zootéchnie
M. CONSTANT	Chimie minérale
M. COSTES	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. COUDERC	Génie Chimique
M. DABOSI	Métallurgie et réfractaires
M. DAT	Mécanique - Hydraulique
M. ECOCHARD	Agronomie
M. ENJALBERT	Génie Chimique

.../.

M. FABRE	Mécanique - Hydraulique
M. FALLOT	Biotechnologie végétale appliquée
M. FOCH	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. GARDY	Génie Chimique
M. GASET	Chimie industrielle
M. GILOT	Génie Chimique
M. GOU'RDENNE	Chimie- Physique
M. GRUAT	Mécanique - Hydraulique
M. HOFFMANN	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. LABAT	Ichtyologie appliquée
M. LEFEUVRE	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. LENZI	Chimie industrielle
M. MARTY	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. MASBERNAT	Mécanique - Hydraulique
M. MATHEAU	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. MATHIEU	Chimie analytique
M. MONTEL	Chimie inorganique
M. MORA	Génie chimique
M. MORARD	Physiologie végétale appliquée
M. MORELIERE	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. MURATET	Génie chimique
M. NOAILLES	Matématiques
M. NOUGARO	Mécanique - Hydraulique
M. TERRON	Zoo Logic
M. THIRRIOT	Mécanique - Hydraulique
M. TRANNOY	Electronique, Electrotechnique,, Automatique
M. TRUCHASSON	Mécanique - Hydraulique
M. VOIGT	Chimie minérale

(mis à jour le 26 novembre 1979)

AVANT-PROPOS

Cette étude a été menée au C N R A de BAMBEY (Sénégal) dans le cadre de l'I S R A (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles) et suivant un programme **défini** conjointement avec l'I R A T (Institut de Recherches Agronomiques Tropicales) et l'I S R A, ces deux organismes étant respectivement celui auquel j'appartiens et celui dans lequel je suis détaché.

Je tiens donc à remercier tout d'abord Messieurs les Directeurs Généraux de l'I S R A et de l'I R A T, ainsi que Messieurs **M'BODJ**, Directeur du C N R A de Bambey et Monsieur BEYE, Chef du département d'agronomie de l'I S R A, de m'avoir donné les moyens de travailler dans de bonnes conditions, et d'avoir dirigé mes travaux avec bienveillance.

Je prie Mademoiselle BERDUCOU, Professeur à l'I N P de TOULOUSE, d'accepter ma **très** profonde reconnaissance pour l'honneur qu'elle m'a fait en voulant bien m'accueillir dans son laboratoire pour présenter cette thèse et en acceptant d'en présider Le jury. J'associe dans ces remerciements, Monsieur MORARD, Professeur à l'I N P de TOULOUSE, qui a bien voulu lire et critiquer Le mémoire sous sa forme provisoire avant sa rédaction définitive et m'a donné de précieux conseils.

Ma reconnaissance va aussi, tout particulièrement, à Monsieur MAERTENS, Maître de recherches à l'I N R A de TOULOUSE, qui a eu une influence très importante dans l'orientation de mes travaux sur les systèmes racinaires, à La fois à travers ses propres résultats, et par les nombreux conseils dont il m'a **fait bénéficiaire** avec toujours beaucoup de disponibilité. Je lui suis extrêmement reconnaissant de m'avoir encouragé à rédiger ce mémoire, et d'en avoir guidé l'élaboration avec une grande attention.

Je remercie très vivement Monsieur TOURTE qui, **comme** Directeur Adjoint de l'I R A T au Sénégal jusqu'en 1975 puis comme Chef de la Division d'Agronomie de l'I R A T à MONTPELLIER, m'a toujours encouragé à poursuivre des études sur la physique du **sol** et les systèmes racinaires. Ce soutien a été très important pour mener à bien ce programme.

Je dois une profonde gratitude à Monsieur NICOU, Chef de ta Division de Physique du Sol de l'I R A T à MONTPELLIER. Monsieur NICOU m'a initié aux méthodes de la recherche agronomique à mon arrivée au C N R A de BAMBEY, et il est à l'origine de mes premières études sur les systèmes racinaires. Depuis il a constamment orienté et suivi de très près les différents aspects de mon programme de recherche sur la physique du sol. au Sénégal. Il a, par ailleurs, Largement facilité La réalisation de ce mémoire, grâce à une lecture attentive du manuscrit et en me proposant de faire réaliser la frappe et le tirage dans son service à MONTPELLIER.

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont participé à cette étude, en particulier, Les techniciens de la division de physique du sol de l'I S R A, Messieurs S. P. SARR, P. O. DIEYE et M. FALL, qui ont assuré la réalisation de nombreux prélèvements et mesures avec compétence et bonne volonté.

Il m'est enfin agréable de citer Madame CAMMAL qui a apporté beaucoup de soin à la frappe et à la présentation de ce mémoire, ainsi que Monsieur LORENTE qui a procédé au tirage et à la mise en pages du document.

S O M M A I R E

	Pages
<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	I
<u>PREMIERE PARTIE : POSITION DU PROBLEME</u>	3
1. ▀ INTRODUCTION	4
II. ▀ CONDITIONS DE L'AGRICULTURE AU SENEGAL	4
2.1. ▀ Le climat	4
2.2. ▀ Les sols	5
2.3. ▀ Les cultures et la production agricole	7
2.4. ▀ Principaux facteurs limitants de La production	8
2.4.1. ▀ L'alimentation hydrique	9
2.4.2. ▀ L'alimentation minérale	9
2.4.3. ▀ Amélioration des conditions d'alimentation hydrique et minérale	11
III. ▀ ROLE DES SYSTEMES RACINAIRES ET FACTEURS INFLUENCANT LEUR CROISSANCE	14
3.1. ▀ Rôle de l'enracinement	14
3.1.1. ▀ Ancrage	14
3.1.2. ▀ Absorption de l'eau et des éléments minéraux	14
3.2. ▀ Facteurs du milieu et croissance racinaire	19
3.2.1. ▀ Propriétés physiques du sol	19
3.2.2. ▀ Propriétés chimiques du sol	21

IV. - NATURE DE L'ETUDE	22
4.1. - Objectifs à atteindre	23
4.2. - Connaissances actuelles des systèmes racinaires de l'arachide, du mil, du sorgho et du riz pluvial	24
4.3. - Domaine de validité de l'étude	27
v. - CONCLUSION	29
<u>DEUXIEME PARTIE : MATERIEL VEGETAL - ET METHODES D'ETUDE UTILISES</u>	31
I. - INTRODUCTION	32
II. - LE MATERIEL VEGETAL	33
2.1. - L'arachide	33
2.2. - Le mil	34
2.3. - Le sorgho	35
2.4. - Le riz pluvial	36
III. - CONDITIONS GENERALES D'EXPERIMENTATION - DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	37
3.1. - Dispositifs expérimentaux - Traitements	37
3.1.1. - Le sorgho	38
3.1.2. - Le riz pluvial	38
3.1.3. - Le mil et l'arachide	39
3.2. - Conditions de milieu des expérimentations	40
3.2.1. - Pluviométrie, conditions hydriques	40
3.2.2. - Les sols	42
IV. - TECHNIQUES D'ETUDE DE L'ENRACINEMENT	44
4.1. - Revue bibliographique sommaire des méthodes d'étude de l'enracinement des plantes herbacées cultivées en pleine terre	45
4.1.1. - Méthodes n'utilisant pas d'éléments radioactifs	45
4.1.2. - Méthodes basées sur l'utilisation des éléments radioactifs	47

4.2.	-	Techniques de prélèvements utilisées	48
4.2.1.	-	Observations et mesures directes sur tranchée	48
4.2.2.	-	Prélèvements par carottages	48
4.2.3.	-	Prélèvements par monolithes	49
4.3.	-	Techniques de caractérisation de L'enracinement	51
4.3.1.	-	Nombre total de racines primaires	52
4.3.2.	-	Poids sec - profits de répartition de ta masse racinaire dans Le sot	52
4.3.3.	-	Profondeur maximale de L'enracinement	52
4.3.4.	-	Rapport poids parties aériennes/racines	52
4.3.5.	-	Longueur totale d'un échantillon de racines	53
4.3.6.	-	Distance moyenne entre tes racines	58
4.3.7.	-	Diamètre moyen des racines	58
4.3.8.	-	Ecart type des diamètres de racines - indice de ramification	59
4.4.	-	Précision des mesures	62
4.5.	-	Traitement des échantillons	64
4.6.	-	Traitement statistique des données	64
4.7.	-	Nombre de prélèvements et de mesures réalisés	65
4.8.	-	Critique des méthodes	65
V.	-	CONCLUSION	66
<u>TROISIEME PARTIE : RESULTATS</u>			67
1.	-	INTRODUCTION	68
II.	-	DEVELOPPEMENT DU SYSTEME RACINAIRE DE L'ARACHIDE AVEC ET SANS TRAVAIL DU SOL	69
2.1.	-	Germination et début de cycle	70
2.2.	-	Evolution du front racinaire au cours du cycle de ta plante	71

2.3.	▪ Evolution du poids total de matière sèche des racines et du rapport poids parties aériennes/ racines	72
2.3.1.	▪ Arachide hâtive : variétés 55-437 et 73-30	72
2.3.2.	▪ Arachide semi-hâtive (57-422)	75
2.4.	▪ Répartition du poids; sec des racines en fonction de ta profondeur	76
2.4.1.	▪ Arachide hâtive (variétés 55-437 et 73-30)	76
2.4.2.	▪ Arachide semi-hâtive 57-422	78
2.5.	▪ Evolution de La Longueur totale des racines au cours du cycle	78
2.5.1.	▪ Variétés hâtives : 55-437 - '73-30	78
2.5.2.	▪ Variétés semi-hâtives 57-422	79
2.6.	▪ Répartition verticale de ta Longueur totale des racines dans Le profit de sot ▪ distances moyennes entre tes racines	80
2.6.1.	▪ Longueur	80
2.6.2.	▪ Distances moyennes entre Les racines	81
2.7.	▪ Variation de La densité racinaire en fonction de La distance par rapport à ta Ligne de semis	81
2.8.	▪ Evolution de La moyenne et de L'écart-type de La population des diamètres en fonction de ta profondeur et du stade de végétation	82
2.8.1.	▪ Variété hâtive (73-30)	82
2.8.2.	▪ Variété semi-hâtive (57-422)	85
III.	- DEVELOPPEMENT DU SYSTEME RACINAIRE DU MIL AVEC ET SANS TRAVAIL DU SOL	86
3.1.	▪ Observations sur La germination et Le début de cycle	87
3.2.	▪ Nombre de racines adventives primaires par poquet et par talle	88

3.3.	- Evolution du front racinaire au cours du cycle	89
3.4.	- Evolution du poids de matière sèche totale des racines et du rapport parties aériennes/racines	91
3.5.	- Répartition du poids sec des racines en fonction de la profondeur	92
3.6.	- Evolution de la longueur totale des racines au cours du cycle	93
3.7.	- Répartition de La longueur totale et de la distance moyenne entre les racines en fonction de la profondeur	96
3.7.1.	- Longueur tota Le	96
3.7.2.	- Distances moyennes entre les racines	96
3.8.	- Variation de La densité racinaire en fonction de la distance par rapport au pied	97
3.9.	- Evolution de la moyenne et de l'écart-type de la population des diamètres en fonction de la profondeur et du stade de végétation	98
IV.	- DEVELOPPEMENT DU SYSTEME RACINAIRE DU SORGHO AVEC ET SANS TRAVAIL DU SOL	102
4.1.	- Germination et début de cycle	103
4.2.	- Evolution du nombre de racines adventives primaires par poquet et par talle	105
4.2.1.	- Variété 63-18	105
4.2.2.	- Variété congossane	105
4.3.	- Evolution du front racinaire au cours du cycle	106
4.3.1.	- Variété 63-18	106
4.3.2.	- Variété congossane	106
4.4.	- Evolution du poids de matière sèche des racines et du rapport poids parties aériennes/racines	107
4.4.1.	- Variété 63-18	107
4.4.2.	- Variété congossane	108
4.5.	- Répartition du poids sec des racines en fonction de la profondeur	108

V. -	DEVELOPPEMENT DU SYSTEME RACINAIRE DU RIZ PLUVIAL AVEC ET SANS TRAVAIL DU SOL	110
5.1.	▪ Germination et début de cycle	111
5.2.	▪ Evolution du nombre total de racines adventives primaires par pied et par talle au cours du cycle de la plante	112
5.2.1.	▪ Variété 1 KONG PAO	112
5.2.2.	▪ Variétés 63-83 et IGUAPE CATETO	113
5.3.	▪ Evolution du front racinaire au cours du cycle de la plante	114
5.3.1.	▪ Variété 1 KONG PAO	114
5.3.2.	▪ Variétés 63-83 et IGUAPE CATETO	115
5.4.	▪ Evolution du poids total de matière sèche des racines au cours du cycle de la plante	115
5.4.1.	▪ Variété 1 KONG PAO	116
5.4.2.	▪ Variétés 63-83 et IGUAPE CATETO	116
5.5.	▪ Evolution du rapport parties aériennes/racines au cours du cycle de la plante	117
5.5.1.	▪ Variété 1 KONG PAO	117
5.5.2.	▪ Variétés 63-83 et IGUAPE CATETO	117
5.6.	▪ Evolution du poids sec des racines en fonction de la profondeur et du stade de végétation	118
5.6.1.	▪ Variété 1 K.P	118
5.6.2.	▪ Variétés 63-83 et IGUAPE CATETO	119
V I.	- CONCLUSION	121
<u>QUATRIEME PARTIE : DISCUSSION -- CONCLUSIONS</u>		122
1.	- INTRODUCTION	123
II,	▪ COMPARAISON DES SYSTEMES RACINAIRES DES DIFFERENTES ESPECES	123
2.1.	▪ Poids total des racines	124
2.2.	▪ Relation entre le poids des parties aériennes et celui des racines	124

2.3.	• Evolution du front racinaire au cours du cycle de la plante	125
2.4.	• Répartition des racines dans le profil de sol	127
III.	• EFFETS DU LABOUR SUR LA CROISSANCE RACINAIRE DES ESPECES ETUDIEES	130
3.1.	• Arachi de	131
3.2.	• Mil	131
3.3.	-- Sorgho	132
3.4.	• Riz pluvial	132
IV.	• CONSEQUENCES ET APPLICATIONS AGRONOMIQUES	134
4.1.	-- Influence de l'enracinement sur les possibilités d'alimentation hydrique et minérale et adaptation des systèmes racinaires des espèces étudiées à l'utilisation de l'eau et des éléments nutritifs du sol	134
4.1.1.	• Définition d'un profil racinaire idéal pour l'alimentation hydrique et minérale des cultures pluviales au Sénégal	134
4.1.2.	• Adaptation des systèmes racinaires étudiés à l'utilisation de l'eau et des éléments nutritifs du sol	138
4.2.	-- Effets agronomiques du travail du sol	142
4.3.	• Apport au sol de matière organique	144
	<u>CONCLUSION GENERALE</u>	146
	<u>BI B L I O G R A P H I E</u>	149
	<u>: SYMBOLES ET ABREVIATIONS UTILISES • DEFINITIONS</u>	163
	<u>ANNEXES</u>	164

-- mieux comprendre, en collaboration avec d'autres spécialistes, les modalités du fonctionnement des systèmes racinaires et de la nutrition des plantes, dans les conditions particulières du Sénégal,

-- évaluer la quantité de matière organique d'origine racinaire laissée dans le sol après la mort de la plante, pour l'établissement de bilans organiques.

Pour entreprendre ces études, nous avons été personnellement amenés à mettre au point, ou à adapter, un certain nombre de techniques de prélèvement. Dans un premier temps, les systèmes racinaires ont été caractérisés à partir de critères classiques : poids de matière sèche, nombre et longueur des racines primaires, ou de mesures très approximatives de longueur totale des racines et des diamètres moyens. En 1974, lors d'un stage à la Station INRA de Toulouse, dans le Laboratoire de M. MAERTENS, nous avons pu, sous la direction de celui-ci, affiner les techniques de caractérisation des systèmes racinaires par l'adaptation ou la mise au point de nouvelles méthodes. Celles-ci ont été appliquées à notre retour au Sénégal, en 1977, pour les études sur le mil et l'arachide.

Afin de mieux comprendre l'intérêt et la finalité des recherches sur les systèmes racinaires au Sénégal, nous commencerons par présenter, dans une première partie, les conditions générales de l'agriculture de ce pays, en insistant sur les problèmes d'alimentation hydrique et minérale. Nous étudierons aussi, à partir de données bibliographiques, le rôle de l'enracinement et les conditions de croissance de celui-ci dans le sol.

Les méthodes de prélèvement de racines et de leur caractérisation, qui ont fait l'objet de mises au point ou d'adaptation de notre part, seul ou sous la direction de M. MAERTENS, seront détaillées.

Enfin, après avoir présenté et discuté les résultats sur la croissance et la morphologie des systèmes racinaires de l'arachide, du mil, du sorgho et du riz pluvial, nous envisagerons les principales conséquences agronomiques qui peuvent en découler.

PREMIERE PARTIE

POSITION DU PROBLEME

I. - INTRODUCTION

Les conditions de croissance des plantes cultivées au Sénégal, et par extension dans la zone tropicale sèche ouest africaine (Sahel) ont, bien sûr, un certain nombre d'analogies avec celles des cultures tempérées. Certaines plantes sont d'ailleurs cultivées aussi bien en climat tempéré que tropical. (sorgho, maïs, etc...), mais il existe aussi des différences importantes. Nous présenterons donc dans cette partie les principales conditions générales de l'agriculture au Sénégal, en nous intéressant plus particulièrement à celles qui peuvent constituer des facteurs limitants de la croissance des racines et de la production de la plante.

De même, les différentes fonctions des racines sont identiques en climats tempérés et tropical, et celles-ci seront rappelées en se référant à des travaux réalisés essentiellement en pays tempérés. Par contre, les caractéristiques de croissance des systèmes racinaires dépendent étroitement des conditions de milieu et peuvent être très différentes, d'une zone écologique à l'autre pour une même espèce.

C'est pourquoi, dans l'étude bibliographique de la morphologie et de la croissance des systèmes racinaires des quatre principales cultures du Sénégal : arachide, mil, sorgho et riz, nous choisirons de privilégier les références tropicales.

II. - CONDITIONS DE L'AGRICULTURE AU SENEGAL

2.1. - Le climat

Le climat du Sénégal, comme celui de toute la zone tropicale sèche ouest africaine, est caractérisé par une opposition tranchée entre une saison sèche pendant laquelle la pluviométrie est nulle, et une saison des pluies dont la durée varie entre trois et cinq mois. La pluviométrie annuelle moyenne totale passe de 300 à 1500 mm du Nord au Sud du pays. La saison des pluies commence généralement en Juin ou en Juillet, et les semis se font dès les premières pluies. La variabilité annuelle des pluies est très forte. Ainsi, dans les zones

où La pluviométrie moyenne est inférieure à 500 mm, elle est de l'ordre de 40 % pour le mois d'Août, au coeur de la saison des pluies, et peut atteindre 80 à 100 % en Juillet et Octobre (DANCETTE, 1975). Pendant ta saison des pluies, la demande évaporative d'origine climatique (Evaporation d'eau libre en bac normalisé classe A) passe en moyenne de 3,5 mm/jour au Sud à 5,2 mm/jour au Nord (DANCETTE, 1976). Ces variations d'évaporation correspondent à une augmentation des conditions d'aridité vers le Nord, faible pluviométrie, températures élevées, degré hygrométrique faible, vents forts et végétation clairsemée.

2.2. ▀ Les sols

Propriétés physiques

Les sols supportant les cultures pluviales (cultures sans autres apports d'eau que la pluie) sont surtout des sols ferrugineux tropicaux et des sols faiblement ferrallitiques. On y rencontre également des sols peu évolués sur matériau meuble sableux.

Ces sols ont en commun deux caractéristiques qui ont une influence importante sur Le profil cultural et sur le développement des plantes :

- ▀ les horizons superficiels sont toujours sableux ou sablo-argileux. Très souvent, l'ensemble du profil est sableux,

- ▀ la kaolinite prédomine dans la fraction argileuse.

La combinaison de ces deux caractéristiques a pour conséquence une quasi inexistence des phénomènes de gonflement et de retrait du sol consécutifs aux variations d'humidité (CHARREAU et NICOU, 1971).

L'ampleur prise par ces phénomènes est en effet en relation, comme l'a montré en particulier MAERTENS (1964), non seulement avec la teneur en argile du sol mais aussi avec la nature de cette argile : à textures identiques, les variations seront minimales pour un sol à kaolinite et maximales pour un sol à montmorillonite.

La densité réelle de ces sols est d'environ 2,65. Les densités apparentes dans les horizons de surface dépendent des techniques culturales

appliquées. Sous culture et sans travail du sol, elles sont élevées, de l'ordre de 1,6 ; la porosité est donc faible (environ 40 %).

La fraction utile de l'eau, définie par la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent, est relativement peu importante. Elle est selon la teneur en argile, de 6 à 12 mm par tranche de 10 cm.

Ces sols possèdent cependant une caractéristique favorable qui est leur grande profondeur. On peut rencontrer une cuirasse latéritique qui arrête les racines, mais, lorsque celle-ci est à moins de un mètre de la surface, le terrain est souvent laissé en friche. La profondeur de sol utile est généralement déterminée par la profondeur maximale atteinte naturellement par le système racinaire.

Propriétés chimiques et physico-chimiques

Dans les sols exondés du Sénégal, Les teneurs en P_2O_5 total et assimilable sont très faibles ; elles sont respectivement de 150 et 7 ppm environ dans le sol dior de Bambey non fertilisé. Par ailleurs, dans ces sols pauvres en argile et en matière organique, la capacité d'échange des cations est limitée. Le complexe absorbant est faiblement saturé en cations avec particulièrement peu de potassium échangeable (0,05 meq/100 g). On note une nette tendance à l'acidification des sols de vieille culture, due au lessivage et à l'insuffisance des restitutions minérales (PIERI, 1976). Cela a pour conséquence, un accroissement de la solubilité de l'aluminium qui peut devenir important dans la fraction absorbable, une diminution de l'assimilabilité du phosphore consécutive à la libération de Al^{+++} et une perturbation de l'activité biologique. Les teneurs en azote total varient de 0,2 à 1 ‰ en surface, avec une nette diminution en profondeur. Les teneurs en azote minéral sont très faibles, sauf au moment des premières pluies après la longue saison sèche. On observe alors une forte reprise de l'activité biologique, et il y a un "pic" de minéralisation important mais généralement très bref. Ensuite, la minéralisation devient extrêmement lente. Le rapport C/N est assez variable, de 8 à 15.

2.3. - Les cultures et la production agricole

Ru Sénégal, les principales cultures pluviales sont, de loin, L'arachide et les céréales : mi 1 et sorgho.

L'arachide occupe à peu près la moitié des 2,5 millions d'hectares cultivés. Cette spéculation procure l'essentiel du revenu monétaire du paysan. La production sénégalaise se situe au cinquième rang mondial et représente environ 40 % des exportations du pays. Le Sénégal est le premier exportateur mondial d'arachide.

Les surfaces de mil et sorgho viennent immédiatement après l'arachide. Le mil est surtout cultivé dans la moitié Nord du Sénégal et Le sorgho dans la moitié Sud. Ils occupent environ 1 million d'hectares chaque année et procurent l'essentiel des ressources vivrières du pays.

Les superficies cultivées en riz (aquatique et pluvial), en maïs, cotonnier et cultures maraîchères viennent loin derrière.

La jachère d'herbe (friche) qui faisait autrefois partie intégrante de la rotation tend à devenir de plus en plus rare sur les terres de culture.

Le niveau de rendement des cultures pluviales est particulièrement bas. Les moyennes générales sont de l'ordre de 600 à 700 kg/ha pour l'arachide et d'environ 500 kg/ha pour le mil et le sorgho. Elles sont sujettes à de très fortes variations annuelles et locales.

La production vivrière du pays est nettement insuffisante pour subvenir aux besoins de la population et de coûteuses importations de céréales sont nécessaires. Elles sont composées de blé, de sorgho et surtout de riz (200 000 à 300 000 tonnes par an).

C'est pourquoi, l'objectif prioritaire du Gouvernement sénégalais est l'amélioration de la production céréalière pour se rapprocher de l'auto-suffisance alimentaire et La sécurisation de la production arachidière pour augmenter les revenus des agriculteurs en les rapprochant de ceux des salariés. Le Gouvernement s'est fixé de tripler le revenu du cultivateur entre 1977 et L'an 2000. Dans L'avenir, l'auto-suffisance alimentaire à L'échelon du pays pourra se faire, en grande partie, grâce à des aménagements hydro-agricoles,

importants prévus dans la vallée du Fleuve Sénégal et dans le Sud du pays. Toutefois,, L'auto-suffisance alimentaire des personnes et du cheptel vivant sur et autour de l'exploitation paraît indispensable. D'autre part, L'augmentation de La population est très élevée, parmi les plus rapides du monde (2,7 % par an).

Dans la plus grande partie des terres agricoles, L'augmentation de la production ne peut plus se faire par l'augmentation des surfaces. Les sols cultivables encore en friche, n'occupent plus que des surfaces très réduites dans beaucoup de régions, en particulier dans toute la zone centrale du pays où la population est déjà très dense (de 60 à 70 ha/km² en moyenne). Ailleurs, Les terres en friche correspondent à des sols médiocres ou à des zones à très faible peuplement, pour des raisons variables, mais souvent par manque de points d'eau.

Si la fertilité naturelle de la terre sénégalaise est faible, sa fertilité potentielle obtenue par l'utilisation de techniques adéquates, paraît presque aussi élevée que celle de bien des sols des pays tempérés. C'est ainsi que des rendements de 2500 kg/ha de mil et d'arachide,, 5000 kg/ha de sorgho peuvent être obtenus en grandes parcelles et en milieu paysan. En expérimentation, les rendements peuvent atteindre 3500 kg/ha de mil, 4000 kg/ha d'arachide, 5000 kg/ha de sorgho et 6000 kg/ha de maïs.

Des rendements élevés sont donc possibles, mais il faut pour cela lever Les principales contraintes de La production.

2.4. - Principaux facteurs limitants de la production

Les différences observées entre les rendements actuels en milieu paysan et les potentialités, sont: dues à des, facteurs techniques et socio-économiques très variés. Parmi eux, on peut citer les variétés parfois mal adaptées, le parasitisme, les mauvaises herbes, l'équipement insuffisant,, La faible technicité de certains agriculteurs.

Toutefois, au Sénégal, comme dans toute la zone tropicale sèche ouest africaine, où la pluviométrie est aléatoire, et les sols pauvres, le niveau d'alimentation hydrique et: minéral paraît jouer un rôle fondamental dans l'élaboration du rendement.

2.4.1.-- L'alimentation hydrique

Dans le Centre du pays, les variétés de millet d'arachide à cycles courts (90-95 jours) ont des besoins en eau de 400 à 450 millimètres. Compte tenu du gradient de demande évaporative, ceci correspond dans l'extrême Sud à 250-280 mm et dans l'extrême Nord à 560-630 mm. Pour les variétés d'arachide semi-hâtives (105 jours), ces besoins sont de 500 à 550 mm dans Le Centre du pays. La confrontation des besoins en eau et de la pluviométrie fait ressortir que, dans presque toute la moitié Nord du Sénégal, les besoins en eau globaux d'un mil de 90 jours sont mal couverts au moins une année sur cinq (DANCETTE et HALL, 1979). Même au Sud de cette zone, des stress hydriques temporaires, fréquents en cours de culture, peuvent avoir une incidence défavorable sur la production à cause des faibles réserves. D'autre part, en zone tropicale, il pleut généralement sous forme de violentes averses. Dans Le Sud du pays, le quart de la pluviométrie tombe avec une intensité supérieure à 63 mm/h (CHARREAU et NICOU, 1971), et une partie importante de l'eau pluviale peut être évacuée par ruissellement et être perdue pour la culture. Enfin, dans les sols sableux à perméabilité élevée ou moyenne, une partie importante de l'eau reçue peut percoler au delà de la zone d'extraction racinaire et être perdue, elle aussi pour la culture.

2.4.2. -- L'alimentation minérale

Si l'on procède à une analyse détaillée et complète d'une plante supérieure, on met en évidence l'existence d'un très grand nombre d'éléments minéraux. Bien que la présence d'un élément dans la plante ne signifie pas forcément qu'il soit indispensable, des auteurs ont pu montrer depuis longtemps que les besoins des plantes en éléments minéraux sont multiples. Certains sont absorbés à des doses de quelques grammes à quelques dizaines de grammes par kilogramme de matière sèche : azote, phosphore, potassium, soufre, calcium, et en quantité moindre magnésium et fer ; d'autres sont absorbés à des doses très faibles et variables de 10^{-1} à 10^{-3} gramme par kilogramme de matière sèche : manganèse, bore, zinc, cuivre, molybdène ; d'autres encore seraient utiles ou même indispensables chez certaines espèces. Enfin, certains ions absorbés peuvent être toxiques (aluminium).

Afin de simplifier, nous nous limiterons, à une revue sommaire des problèmes d'alimentation minérale au Sénégal en ce qui concerne les trois principaux éléments N, P, K, qui, dans ce pays, ont été les mieux étudiés ; car c'est pour ces trois éléments que l'approvisionnement de la plante dans le sol peut être un facteur limitant important. Parmi les autres éléments, des carences en soufre et en molybdène ont toutefois été mises en évidence dans certaines conditions et en particulier sur arachide.

L'Azote

La nutrition azotée des plantes au Sénégal est très différente suivant que l'on s'adresse à l'arachide qui est une légumineuse, ou aux céréales. Les mobilisations totales en azote sont de l'ordre de 80 à 100 kg/ha pour chacune des espèces en conditions de culture intensive.

Sauf au moment du pic de minéralisation (cf. par. 2.2) en début de cycle, les teneurs du sol en azote minéral sont très faibles. Parfois, après une période sèche au moment de la reprise des pluies, on peut cependant assister à une réactivation de la minéralisation. En dehors de ces périodes, la nitrification se fait uniquement au niveau de la rhizosphère où elle peut être importante (GANRY, commun. pers.). On conçoit dans ces conditions que l'alimentation azotée des céréales soit difficile en milieu non enrichi en engrais azoté. Il convient de semer les céréales en sec ou dès les premières pluies pour profiter au maximum de l'azote libéré en début de cycle, car la minéralisation paraît alors suffire pour satisfaire la demande de la jeune plante.

En conditions de culture traditionnelle, une forte proportion de l'azote nécessaire à l'arachide peut lui être apportée à partir de l'azote de l'air par fixation symbiotique grâce au rhizobium présent dans tous les sols. Toutefois, cette fixation peut être largement diminuée en conditions de milieu défavorables. Elle paraît particulièrement sensible à une diminution de pH qui entraîne une libération d'aluminium échangeable (PIERI, 1976), aux conditions hydriques du sol et à sa température (DUCERF, 1978), ainsi qu'à son aéraulion (WEY et OBATON, 1978). Enfin, on constate que la plante s'alimente préférentiellement à partir de l'azote du sol : en culture améliorée, avec apport d'azote, la plante ne fixe plus que de 20 à 70 % de ses besoins (GANRY, 1975).

Le phosphore

La carence phosphorée est la règle dans tous les sols du Sénégal, du fait de la très faible teneur en phosphore aussi bien sous forme assimilable que totale (cf. par. 2.2). Cela constitue un facteur limitant important de la production des cultures dont les besoins sont de 20 à 40 kg/ha de P_2O_5 en culture améliorée, suivant les espèces et le niveau de production.

Le potassium

Les teneurs en potassium échangeable sont très faibles dans les sols du Sénégal (cf. par. 2.2) et les mobilisations de cet élément sont importantes, de 40 à 80 kg/ha de K_2O suivant les cultures et la production de matière sèche. Malgré cela, on ne constate pas de carence, excepté après plusieurs années de culture intensive sans apport. Deux explications peuvent être avancées :

- les réserves en potassium total sont relativement importantes, dans les feldspaths du sol et peuvent facilement passer à l'état échangeable (PIERI, 1977),
- Le potassium mobilisé est surtout emmagasiné dans les pailles qui sont en partie restituées.

En culture traditionnelle sans fertilisation, la faible demande instantanée et totale des plantes en éléments nutritifs est à peu près satisfaite par le sol, au prix d'une évolution lente vers la baisse de fertilité, qui se manifeste surtout sur arachide.

Par contre, toute amélioration des conditions de culture et du matériel génétique engendre des besoins plus élevés que le sol ne peut plus satisfaire. Ainsi, l'élévation des rendements nécessite la préservation et l'amélioration de la richesse chimique du milieu, et des conditions physico-chimiques de celui-ci (restitutions organiques et amendements calciques).

2.4.3. - Amélioration des conditions d'alimentation hydrique et minérale

On peut améliorer l'alimentation hydrique des cultures, par une meilleure adaptation des cycles aux caractéristiques climatiques (DANCETTE,

1975) et par une amélioration de la tolérance à la sécheresse (GAUTREAU, 1977). Ce sont des objectifs de recherche importants dans les programmes de sélection des principales cultures au Sénégal, en particulier pour le mil et l'arachide.

L'irrigation, soit totale, soit complémentaire, est un moyen puissant pour améliorer et surtout pour régulariser les rendements par rapport à ceux des cultures soumises aux aléas climatiques de la zone. Les possibilités d'irrigation dans les sols sableux exondés à partir des nappes phréatiques ou des eaux de surface, sont étudiées avec attention au Sénégal. Malheureusement, cette technique, malgré son intérêt évident, ne pourra concerner qu'une superficie très limitée du territoire, une minorité de paysans d'une bonne technicité et certaines spéculations plus directement rentables.

Pendant longtemps encore, dans la majeure partie du Sénégal et de la zone sahélienne, l'amélioration de l'alimentation hydrique ces cultures passera par une utilisation optimale des ressources pluviales.

Une amélioration des conditions d'alimentation hydrique peut aussi se faire grâce à un aménagement du système sol-eau. Il faut, en particulier, réduire les pertes d'eau par ruissellement, évaporation du sol nu et consommation par les mauvaises herbes. Un certain nombre de techniques agronomiques permettent d'y arriver (CHOPART, 1975 ; NICOU et CHOPART, 1977 ; CHOPART, NICOU et VACHAUD, 1979).

L'amélioration des conditions d'alimentation minérale passe par l'augmentation ou le maintien de la richesse du milieu en éléments nutritifs grâce à la pratique d'une fertilisation. Celle-ci a pour but de corriger la carence du sol en phosphore par un apport unique de 500 kg/ha de phosphate tricalcique naturel qui se solubilise lentement, et d'entretenir la fertilité par des apports annuels d'engrais N, P, K. Ces apports annuels correspondent à des doses qui, globalement, permettent de compenser les exportations en grains, les pailles étant supposées revenir au sol, ce qui n'est d'ailleurs pas entièrement le cas. On n'apporte pas ou très peu d'azote avant la culture d'arachide, la fixation symbiotique pouvant en grande partie subvenir aux besoins de la plante à condition que le rhizobium se trouve dans des conditions favorables de pH, d'humidité, de température et d'aération.

III, ■ ROLE DES SYSTEMES RACINAIRES ET FACTEURS INFLUENCANT LEUR CROISSANCE

3.1., ■ Rôle de l'enracinement

Les systèmes souterrains des plantes annuelles ont deux fonctions essentielles : ils assurent à la fois un rôle d'ancrage et d'absorption par la plante de l'eau et des éléments minéraux. Ils peuvent aussi constituer un organe de réserves, mais ce n'est pas le cas des principales plantes de culture annuelle au Sénégal. Enfin Les racines sont, comme tous les organes vivants du végétal, Le siège d'un métabolisme qui a une incidence sur le fonctionnement général de La plante.

3.1.1. ■ Ancrage

Le système racinaire assure la fixation de La plante sur son support, Le sol, et maintient la verticalité de La tige. La plante peut être soumise à des forces tangentielles élevées lorsque son développement en hauteur est important, comme c'est Le cas au Sénégal du mil et du maïs (2 à 2,5 m) et du sorgho dont certaines variétés dépassent 4 mètres de haut. Ce sont surtout les grosses racines principales partant latéralement des premiers noeuds qui permettent la rigidité du système. Chez te sorgho à pailles hautes, des racines peuvent être émises sur des noeuds situés jusqu'à plus de 30 cm du sol. Le degré de ramification des racines qui assure Le contact intime avec Le milieu est aussi un facteur important. On a pu mettre en évidence des relations entre certaines caractéristiques du système racinaire et la résistance à la verse de différentes plantes (HAMILTON, 1951 ; SECHLER, 1961 ; PINTUS, 1967 ; CRAIG, 1968 ; MIYASAKA, 1969).

3.1.2. ■ Absorption de l'eau et des éléments minéraux

IL s'agit inconstestablement du rôle le plus important des systèmes racinaires chez les végétaux supérieurs. La plante puise dans Le sol, grâce à ses racines, l'eau et Les éléments minéraux indispensables à son développement. Le rôle des autres organes dans l'alimentation hydrique et minérale est généralement négligeable dans les conditions normales de fonctionnement de la plante.

Les doses d'engrais, préconisées par La recherche et les organismes de développement sont les suivantes (en kg/ha) :

	N	P	K
Arachide	12	27	40
Mil	60	32	32
Sorgho	79	32	32
Riz	76	36	54

Malheureusement, ces doses sont loin d'être entièrement appliquées. Une forte proportion des surfaces cultivées ne reçoit en fait que de très faibles doses d'engrais. Les sols du Sénégal constituent par ailleurs un milieu très fragile et Le maintien de La fertilité en culture semi-intensive fertilisée ne parait pas encore entièrement résolu. En effet, des apports d'engrais peuvent en particulier entrainer des déséquilibres à cause du très faible pouvoir tampon du sol.

Cependant, c'est par Les racines des plantes que se fait l'essentiel de L'alimentation hydrique et minérale. IL ne servirait donc à rien d'améliorer l'humidité et La richesse chimique du sol si Les systèmes racinaires ne pouvaient trouver des conditions de croissance et de fonctionnement correctes, pour intercepter et utiliser Les réserves disponibles. D'autre part, une amélioration du degré d'exploration du milieu par Les racines a pour effet de mieux répartir la demande dans Le sol et devrait donc permettre d'obtenir le même résultat à un niveau de richesse du sol plus bas.

Dans le cadre d'une politique d'amélioration de La productivité des cultures, il convient donc d'examiner avec soin Ce rôle de L'enracinement et Les facteurs qui L'influencent, au même titre que Les autres facteurs et conditions de rendement de La plante. Cela parait particulièrement vrai dans Le contexte sénégalais qui vient d'être défini.

3.1.2.1. - Mécanismes d'absorption racinaire

Eau

À l'interface sol-racine et au niveau du parenchyme cortical de la racine, le mouvement de l'eau se fait toujours dans le sens du gradient de pression osmotique. Au niveau du passage dans les tissus vasculaires, le relais du gradient de pression est pris par la succion exercée au niveau du feuillage et transmise à tout le système vasculaire du xylème. Cette succion peut être très forte, car la perte d'eau par transpiration à la surface des feuilles est généralement importante (7 litres d'eau par pied de mil et par jour au stade floraison). Enfin, d'après certains auteurs (MORIZET et ROBÉLIN, 1975), un second processus dépendant du métabolisme paraît exister.

Deux contraintes principales peuvent cependant freiner l'absorption de l'eau par la racine :

• Une contrainte liée au sol

La force de rétention de l'eau par le sol dépend principalement du potentiel capillaire. Une terre humide, bien ressuyée, possède un potentiel hydrique faible de 0,1 à 1 bar. Mais dès que le sol se dessèche, la force de rétention augmente rapidement jusqu'à des valeurs très élevées de plusieurs dizaines de bars. La pression osmotique de la cellule peut augmenter par perte d'eau et concentration du suc vasculaire, mais la pression maximale reste limitée ; BRIGGS et SHANTZ (1952) admettent des valeurs de 15 bars (pf 4,2).

Toutefois, des travaux plus récents, réalisés au champ et en pots montrent que la tension de l'eau au-delà de laquelle des réserves hydriques ne sont plus utilisables peut dépasser 15 bars, et que ce phénomène paraît lié aux caractéristiques du sol et du système racinaire (IMAERTENS, BLANCHET et PUECH, 1974).

• Une contrainte liée à la plante

Le transfert de l'eau du sol vers les feuilles, à travers le végétal, est freiné par un certain nombre de résistances situées principalement à l'interface sol-racine, dans les différents tissus racinaires (notamment au niveau de l'endoderme) et dans les parties aériennes. Cependant, les succions exercées par l'atmosphère sont beaucoup plus grandes, et la principale limi-

tation de l'évapotranspiration dans la plante se fait à l'interface feuille-air, avec la régulation stomatique.

Eléments minéraux

L'absorption des éléments nutritifs par les racines paraît encore plus complexe, et beaucoup de mécanismes restent encore du domaine de l'hypothèse.

L'absorption des principaux éléments nutritifs se fait généralement à contre gradient de concentration. Pour expliquer cette anomalie par rapport aux simples lois de la diffusion des ions, plusieurs mécanismes semblent intervenir, certains faisant appel à des théories mécanistes (loi de DONNAN, électro-osmose), d'autres au métabolisme (EPSTEIN et HAGEN, 1952 ; EPSTEIN, 1953). Les mécanismes peuvent être différents suivant les ions considérés, mais on peut tenter de schématiser ainsi les phénomènes.

Il y aurait d'abord une adsorption des ions et plus particulièrement des cations à la périphérie des racines sur des sites d'échanges, à la suite de quoi ils seraient absorbés par la racine suivant deux processus :

- une absorption réversible et passive dans un "espace libre apparent" n'ayant d'ailleurs pas de limite précise au niveau de la cellule ou des tissus,

- une absorption active se faisant à contre gradient de concentration, et donc nécessitant une dépense d'énergie par intervention directe du métabolisme.

Les ions passent ainsi à travers l'endoderme pour atteindre les tissus vasculaires, d'où ils migrent par translocation dans le végétal. Cependant, pour certains ions comme le calcium, l'absorption semble souvent uniquement passive (HELLER, 1969).

Si les mécanismes de l'alimentation hydrique et minérale sont distincts, il existe toutefois une liaison étroite entre ces deux phénomènes. Les mécanismes de l'absorption minérale supposent un bon état d'hydratation des racines et donc une alimentation hydrique correcte. De plus, le flux hydrique

dans le sol (BLANCHET, MAERTENS et BOSC, 1974 ; NYE, 1972 ; BLANCHET et al, 1974), comme dans la plante (HELLER, 1969) influence l'alimentation minérale.

Capacité d'absorption des racines

Sur maïs, en culture hydroponique, quelques racines peuvent subvenir aux besoins de la plante grâce à une capacité très élevée d'absorption de l'eau et des principaux éléments nutritifs (MAERTENS, 1971).

L'âge de la racine ne semble pas avoir une influence marquée sur la capacité d'absorption (MAERTENS, 1971). D'après cet auteur, les parties basales des racines ont des possibilités d'absorption plus élevées que les parties apicales, lorsque celles-ci sont rattachées à la plante (MAERTENS, 1971).

En vases de végétation, les capacités d'absorption de l'eau et des éléments minéraux des racines de maïs sont généralement très grandes. A condition que le sol soit fortement enrichi et constamment maintenu à une humidité optimale, une faible proportion de l'enracinement peut alors subvenir aux besoins de la plante (MAERTENS, 1971).

3.1.2.2. - Absorption de l'eau et d'éléments minéraux en conditions naturelles

Une certaine absorption des éléments minéraux pourrait se faire par contact direct entre les racines et le sol (JENNY, 1953 ; BLANCHET et al, 1962), mais la surface totale du système racinaire en contact avec le milieu est très nettement inférieure à celle de l'ensemble des particules de sol, avec une différence de l'ordre de 10^5 (MAERTENS et BOSC, 1976). La quantité d'éléments minéraux directement en contact des racines est donc très faible et l'alimentation minérale nécessite un déplacement des ions, des sites de rétention vers les racines.

Pour cela, la rhizosphère est réapprovisionnée par des flux de diffusion des ions des zones les plus riches vers les zones appauvries par l'absorption racinaire, et par un transport vers les racines appelé mass flow (FRIED et BROESHART, 1967 ; BLANCHET, 1968 ; NYE, 1972).

La diffusion, sous la dépendance du gradient de concentration, est influencée par la richesse du milieu, l'humidité, la température du sol et par certaines caractéristiques physico-chimiques (capacité d'échange pour le potassium et pouvoir fixateur pour le phosphore) (BOSC et BLANCHET et al, 1974), ainsi que par la distance à parcourir (colonisation du sol par les racines).

Les transports par mass flow qui comprennent la circulation dans et par la phase liquide, sont très complexes. Ils sont liés à l'humidité du sol, au transport d'eau, à l'intervention d'échanges continus entre la solution du sol et le complexe absorbant, et à la libération d'anions, notamment de carbonates, par la respiration des racines (MAERTENS et BOSC, 1976). Ceci permet d'expliquer qu'il peut ainsi venir aux racines des quantités de potassium supérieures à ce que la concentration de la phase liquide pourrait laisser supposer (BLANCHET et BOSC, 1969).

Dans le sol, ces mouvements d'ions vers les racines s'effectuent sur des distances limitées, de l'ordre du décimètre pour les nitrates par accompagnement de la phase liquide, du centimètre pour le potassium, par diffusion et mass flow et du millimètre pour le phosphore, essentiellement par diffusion (BLANCHET et al, 1974).

Au champ, l'approvisionnement en eau de la plante dépend des stocks hydriques, de la cessibilité de l'eau (PUECH, 1969), et surtout de la colonisation du système racinaire (MAERTENS, BLANCHET et PUECH, 1974 ; TAYLOR, 1978 ; IYAERTENS, 1979). Il semble que les parties proximales des racines, situées près du collet, ont des possibilités d'absorption plus grandes que les parties basales (MAERTENS, 1971). Or le degré d'exploration du sol par les racines est généralement meilleur vers la surface ; les possibilités d'extraction racinaire de l'eau y sont donc plus fortes. Les systèmes racinaires de plusieurs espèces peuvent ainsi assécher le profil au delà du pF 4,2 dans les horizons superficiels tandis qu'en profondeur, le profil d'assèchement maximum correspond très souvent à une humidité nettement supérieure à celle du pF 4,2 (MAERTENS, BLANCHET et PUECH, 1974).

Ces mécanismes de transfert des éléments minéraux et de l'eau du sol vers les racines, et ceux de l'absorption racinaire proprement dite sont complexes et encore assez mal connus.

On retiendra surtout que les distances de **migration** dans le sol, vers les racines du potassium et surtout du phosphore, sont faibles.

Ces deux éléments vitaux nécessitent une bonne exploration du **sol** par les racines pour être absorbés en quantités suffisantes. Lorsque les distances entre les racines sont supérieures aux distances de **migration** possible de ces éléments, Le volume de sol réellement utile dépend **directement** de La longueur totale de l'enracinement ; il en est de même pour l'eau.

En ce qui concerne les nitrates très peu retenus par le sol,, leur **déplacement** vers les racines se fait facilement avec la solution du **sol** absorbée par la plante pour ses besoins hydriques. Toutefois, ils sont très sensibles, à la lixiviation, et un enracinement bien développé améliore les **possibilités** d'interception racinaire avant leur migration en profondeur.

De nombreux auteurs ont d'ailleurs souligné l'importance d'un bon développement racinaire pour La nutrition minérale et hydrique de la **plante** (MAERTENS, BLANCHET et PUECH, BARBER, 1974 ; TAYLOR, 1978 ; DREW, 1979 ; MAERTENS, 1979).

3.2. - Facteurs du milieu et croissance racinaire

3.2.1. - Propriétés physiques du sol

Les relations entre la porosité du **sol** et l'enracinement ont fait l'objet de nombreuses études (SCHUURMAN et GOEDEWAGEN, 1956 ; HIDDING et VANDENBERG, 1960 ; TAYLOR et GARDNER, 1963 ; MAERTENS, 1963-1970 ; CHATTERJEE et RATTAN LAL, 1968).

Des relations étroites ont souvent été trouvées entre la porosité et l'enracinement, même lorsque la porosité varie dans de **faibles proportions**. HIDDING et VANDENBERG, en accord avec SCHUURMAN, estiment qu'une porosité de 40 % est une limite au-dessous de laquelle l'enracinement éprouve de **grandes** difficultés à se développer.

Cette action de la porosité sur l'enracinement est due essentiellement à deux propriétés qui en découlent : la résistance mécanique à la **péné-**tration et l'aération du sol. L'état hydrique du sol a aussi une action sur

ces deux dernières propriétés : une forte humidité du sol diminue la résistance à la pénétration (MAERTENS, 1964 ; NICOU, 1975 ; CHOPART, 1978), mais diminue aussi l'aération pour une porosité donnée.

Bien que le rôle de l'aération du sol ne soit pas négligeable, surtout en conditions extrêmes (Madame PER'IGAUD, 1966-1967 ; HOPKINS et PATRICK, 1969), la résistance mécanique des sols a une influence prépondérante sur la croissance racinaire (GILL et MULLER, 1956 ; MAERTENS, 1964-1970 ; MIRREH et KETCHESON, 1973 ; TAYLOR et GARDNER, 1963 ; Madame PERIGAUD, 1966 ; MEREDITH et PATRICK, 1961 ; TAYLOR, 1979).

D'après TAYLOR et GARDNER (1963), il n'y a plus de croissance racinaire du cotonnier en sol sableux lorsque la force de résistance à la pénétration est supérieure à 29 bars. Toutefois, la croissance racinaire est ralentie bien avant ces valeurs (BARLEY et GREACEN, 1967 ; RUSSEL et GOSS, 1974).

Mais d'autres propriétés physiques du sol peuvent aussi avoir leur importance. Parmi elles, on citera la texture, la température, l'état hydrique.

La croissance racinaire est favorisée par une texture grossière (CFEHRENBACHER et RUST, 1956). (Cependant, en sol argileux humide, le milieu peut être déformé par les racines (CHAMPION et BARLEY, 1969) tandis qu'en sol sableux, le milieu est beaucoup plus rigide. Tout dépend alors de la dimension des pores du sol et du diamètre des racines. Les sols sableux fins et tassés sont en général mal explorés par les racines CHENIN et al, 1960).

La température du sol, dans les limites biologiques, stimule les phénomènes de croissance racinaire et de rhizogénèse, sa vitesse en particulier (GAUTHERET, 1968 ; NIELSEN, 1974). Elle a aussi une influence sur la direction de croissance des racines (ONDERDONK et KETCHESON, 1973).

Un léger déficit hydrique semblerait favoriser la croissance racinaire (KAMACHARYA, 1973), mais on l'a vu, l'assèchement du sol s'accompagne généralement d'une augmentation de la résistance mécanique qui est un facteur défavorable à la croissance. Par contre, une période sèche de courte durée agit sur certaines graminées comme un facteur stimulant de l'initiation racinaire dans la période qui suit la réhumidification (PICARD, 1973).

Au Sénégal, en conditions de sol sableux à faible porosité, des relations étroites ont été obtenues entre la porosité du sol et la croissance racinaire sur les principales cultures (BLONDEL, 1965 ; NICOU et THIROUIN, 1968 ; CHOPART et NICOU, 1976 ; CHOPART, 1980). Une diminution de la porosité entraîne généralement une diminution de la densité racinaire. On a pu aussi mettre en évidence une relation entre la résistance mécanique du sol à la pénétration et la croissance racinaire du mil (CHOPART, 1980).

3.2.2. - Propriétés chimiques du sol

Dans un essai, en vases de végétation sur un sol uniformément enrichi et cultivé en fléole, MAERTENS (1970) a montré que, lorsque la croissance des racines n'est pas limitée par la porosité, leur quantité continue à augmenter avec la richesse d'un milieu équilibré en N P K jusqu'à un niveau alimentaire très élevé ; L'augmentation du poids des racines est comparable à celui des parties aériennes. Par contre, en milieu tassé (porosité < 40 %), la croissance racinaire atteint son maximum dès que la porosité devient le facteur limitant principal ; l'augmentation du niveau de richesse chimique du sol n'a plus alors aucune influence sur l'enracinement.

Chacun des éléments P et K paraît avoir une influence propre sur la croissance racinaire : Le phosphore favorise nettement la croissance des racines (DIEHL, 1957 ; LEMAIRE, 1974) et des poils absorbants (BOLE, 1973) ; le potassium a aussi une action marquée (CLIEBHARDT et MURIFOCK, 1965) mais plus irrégulière (HARRIS, 1968).

L'azote, par contre, paraît avoir une action beaucoup moins nette sur l'enracinement, et même dépressive en cas d'apports très importants (MAERTENS, 1970 ; LEMAIRE, 1974) surtout lorsque cet apport n'est pas équilibré par des doses correspondantes de P et de K (MAERTENS, 1970).

Certaines substances chimiques libérées par la décomposition de la matière organique peuvent activer la croissance racinaire, comme des composés quinoniques (FLAIG, 1954), ou au contraire les freiner, comme des acides phénols produits dans certaines conditions par la décomposition des racines et des pailles de sorgho (CHOPART et NICOU, 1974 ; BURGOS-LEON et al., 1978).

L'aluminium, lorsqu'il est libéré dans le sol à l'état de cation échangeable à des pH inférieurs à 5 peut devenir toxique pour de nombreuses plantes. Chez certaines espèces (Lupin), il peut réduire l'absorption du phosphore (GUERRIER et MORARD, 1978). Il peut aussi freiner et même arrêter la croissance racinaire (RIOS et PEARSON, 1964 ; ANDREW, JOHNSON et STANDLAND, 1973). Les effets du cation Al^{+++} sur la croissance des racines varient beaucoup suivant les espèces, le pH, la température, et la concentration en d'autres cations comme le calcium et le magnésium (FOY, 1974 ; PEARSON, 1970). Au Sénégal, les sols sont en très grande majorité acides, avec des pH de 5 à 7 qui peuvent parfois descendre en dessous de 5 sur des terrains de vieille culture (PIERI, 1976). Dans ces conditions, des phénomènes de toxicité aluminique, qui ont été décelés sur arachide (PIERI, 1976) et semblent aussi intervenir sur cotonnier (ANGÉ, 1979 commun., pers.) peuvent faire craindre, dans certains cas, un effet défavorable de l'aluminium échangeable sur la croissance racinaire.

IV. NATURE DE L'ETUDE

Le développement du système racinaire joue un rôle très important dans la nutrition et la productivité des cultures sur milieu naturel. 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 de l'extension du système racinaire.

Dans le cadre de l'intensification de l'agriculture, à côté de l'amélioration de la richesse du sol en éléments nutritifs 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, comme nous le verrons, la connaissance des systèmes racinaires de ces **plantes** tropicales est encore très fragmentaire, en particulier, pour Les deux **principales** cultures du Sénégal : L'arachide et Le mil.

Le besoin se faisait donc sentir d'examiner, en priorité, Les modalités de La croissance racinaire de L'arachide, du **mil** et du sorgho qui sont de Loin Les principales cultures mais aussi du riz pluvial,, dont Les surfaces cultivées sont encore assez restreintes mais appelées à un **plus** grand développement dès que L'on aura résolu certains problèmes aigus d'alimentation minérale et hydrique de cette plante.

4.1. - Objectifs à atteindre

L'étude qui va suivre tentera de répondre à ces besoins avec comme principaux objectifs :

1°/ obtenir un "référentiel" pour pouvoir situer des observations ponctuelles par rapport aux conditions générales de croissance racinaire,

2°/ comparer Les conditions de croissance racinaire au Sénégal avec **celles d'autres** régions,

3°/ mieux appréhender Les mécanismes de L'alimentation hydrique et **minérale** et aider à déceler Les problèmes qui peuvent se poser.

Au Sénégal, Les spécialistes de La nutrition minérale des plantes, de La chimie du **sol**, de La bioclimatologie et de L'alimentation hydrique, ont chacun exprimé Le souhait, pour La conduite de Leurs travaux et L'interprétation de Leurs résultats, de connaître plusieurs caractéristiques de L'enracinement aux différents stades de végétation ; **il** s'agit en particulier de La profondeur de l'enracinement (drainage, Lixiviation, réserves **utiles**), de La Longueur et du diamètre des racines (nutrition). Or, **il** ne Leur est souvent pas possible d'étudier en détail Les systèmes racinaires des cultures de Leurs expérimentations in situ, pour des raisons d'ordre **méthodologique** (perturbation du terrain) et pratique.

4°/ connaître La biomasse racinaire totale qui retourne au sol après la mort de la plante, et sa répartition dans Le profil.. Au Sénégal, où Les apports de matière organique sont pratiquement inexistantes, Le seul enrichissement régulier provient des résidus des systèmes racinaires. Même si ceux-ci représentent de faibles quantités, il paraît important de les inclure dans le bilan organique,

5°/ donner des indications aux sélectionneurs sur La "qualité" et la variabilité de l'enracinement de Leur matériel végétal,

6°/ faciliter la généralisation des résultats agronomiques grâce à la modélisation et à la simulation. De nombreux travaux ont récemment fait état de la possibilité de modéliser les phénomènes d'extraction racinaire de l'eau et des éléments minéraux dans le sol (VAN BAVEL, STRIK et BRUST, 1968 ; MULZ et REMSON, 1970, NYE et MARLOTT, 1969 ; TAYLOR et KLEPPER, 1975-1978 ; FEDDES et al, 1976 ; HILLEL et TALPAZ, 1976 ; BUSSCHER et FRITTON, 1978 ; MASSAD, 1979).

D'autres auteurs proposent des modèles plus globaux, permettant de prévoir l'évolution des profils hydriques sous culture (HILLEL, TALPAZ et BAN KEIJLEN, 1976 ; FRANQUIN et FOREST, 1977 ; HALL et DANCETTE, 1978).

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 racinaires introduites.

4.2. Connaissances actuelles des systèmes racinaires de l'arachide, du mil, du sorgho et du riz pluvial

Les questions posées sur la morphologie et La Croissance en plein champ des systèmes racinaires des principales cultures annuelles au Sénégal ne peuvent actuellement trouver que des réponses très fragmentaires, car dans ce domaine Les travaux ont été particulièrement peu nombreux.

Travaux réalisés en dehors du Sénégal

Les seules informations qui ont pu être rassemblées sur la croissance de l'enracinement de l'arachide en climat tropical concernent des travaux réalisés au Tanganyika (Tanzanie) et au Soudan (LEA, 1961). Des études en milieu aéroponique sont actuellement réalisées en France sur des variétés en provenance du Sénégal (BEUNARD, commun. pers.).

L'enracinement du mil a, lui aussi, été très peu étudié en Afrique; Les seuls résultats disponibles proviennent du Sénégal.

Ai leurs, certains aspects de l'enracinement du mil ont été abordés, en Inde en vases de végétation (RATNASWAMI, 1960) ou au champ CKANITCAR, 1944), et en Australie (WETSELAAR et NORMAN, 1960 ; BEGG, 1965 ; BEGG et al, 1964). Mais ils s'agit toujours de variétés dont La morphologie est très différente de celles cultivées au Sénégal.

L'enracinement du sorgho a fait l'objet de travaux un peu plus nombreux essentiellement en climat tempéré, en conditions de plein champ (MILLER, 1916 ; CLURE et HARLEY, 1962 ; NAKYAMA et VAN BAVEL, 1963, mais surtout en vases de végétation ou en culture hydroponique CARTSCHWAGER, 1948 ; BUR, MORARD et BERDUCOU, 1974 ; BLUM, ARKIN et JORDAN, 1977 ; ABDELLATIF, NOUR et WEIBEL, 1978). En Afrique, les seuls résultats disponibles ont été obtenus par CEA (1961) au Tanganyika (Tanzanie) et au Soudan.

Enfin, parmi les principales cultures du Sénégal, seul le riz pluvial a fait l'objet d'études relativement poussées en milieu tropical.

Les premières études au champ ont été faites au Congo Belge (Zaïre) (PELERENTS, 1958, puis surtout en Côte d'Ivoire (REYNIERS, KALMS et RIDDERS, 1976 ; PICARD et JACQUOT, 1976 ; REYNIERS et al, 1978 ; FORESTIER, 1979). L'enracinement du riz pluvial a aussi été étudié en culture aéroponique (TRUONG et BEUNARD, 1978).

Les résultats obtenus dans d'autres régions peuvent être de bons éléments de comparaison. Mais, même s'ils sont obtenus en région tropicale, ils ne s'appliquent pas forcément aux conditions du Sénégal, à cause de la très grande sensibilité des racines aux conditions de milieu. Chez Le riz

pluvial en particulier, la plupart des auteurs ont mis en évidence de très grandes différences variétales et des fluctuations importantes en fonction des caractéristiques du sol,,

Travaux réalisés au Sénégal

Au Sénégal, de nombreux résultats sont disponibles sur différentes plantes en ce qui concerne les réactions de la densité racinaire (en g de racines par dm³ de sol) aux conditions physiques du sol et aux techniques culturales dans les horizons de surface (NICOU et THIROUIN, 1968 ; CHOPART, MAUBQUSSIN et NICOU, 1970 ; CHOPART et NICOU, 1976 ; CHOPART, 1975 ; CHOPART, NICOU et VACHAUD, 1979).

Dans ce pays, Les études sur la morphologie et la croissance de L'enracinement ont essentiellement: porté sur le riz pluvial (NICOU, SEGUY et HADDAD, 1970). Ces auteurs ont comparé l'enracinement de quatre variétés de riz pluvial. avec et sans travail du sol, ce qui a permis d'aboutir à des indications très intéressantes sur Le comportement de L'enracinement de la plante, Les différences variétales et L'influence des conditions physiques du SOL. Toutefois, Les mesures portent sur un seul. stade de végétation (grain laiteux) et certaines mesures, parmi les plus intéressantes (longueur, profondeur,, diamètre) ont été réalisées sans répétition ce qui limite quelque peu la portée des conclusions.

Le système racinaire de l'arachide a été étudié très tôt (ORGIAS, 1951) mais dans des conditions de culture fort éloignées de La pratique habituelle (espacements de 2 mètres entre chaque pied alors que la densité normale est de 10 à 15 pieds/m²). D'autre part, on dispose seulement des valeurs de poids frais et de longueur de pivot. L'étude de l'enracinement du mil a été abordée par VIDAL (1963), mais uniquement en bacs de végétation ; et par SIBAND (1979) qui s'est intéressé aux dix premiers jours du cycle en culture hydroponique.

Jusqu'en 1970, date du début des travaux qui font L'objet de la présente étude, L'enracinement du sorgho n'avait fait, à notre connaissance, l'objet d'aucun travail.

4.3. - Domaine de validité de l'étude

L'étude de la morphologie et de la croissance des systèmes racinaires des principales espèces cultivées au Sénégal présente un intérêt scientifique et pratique certain, car les études agronomiques qui font appel à la connaissance des enracinements sont nombreuses et variées, et cette connaissance est très fragmentaire.

Toutefois, on se trouve confronté dans ce type de recherche à plusieurs problèmes. Il s'agit en particulier des difficultés de l'examen des organes souterrains développés sur substrat naturel qui empêchent de multiplier les prélèvements d'échantillons et de la très grande variabilité des systèmes racinaires des cultures in situ dont la croissance dépend, on l'a vu, de nombreux facteurs.

Il faudrait normalement, caractériser, isoler et faire varier chacun des facteurs principaux qui influencent la croissance racinaire, ce qui est exclu au Sénégal.

Dans ces conditions, il peut paraître vain de vouloir étudier l'enracinement des cultures directement en conditions naturelles.

Tout en étant conscient de ces limites, l'intérêt d'un début de connaissance, même imprécise, des principales caractéristiques morphologiques des systèmes racinaires des plantes, nous a paru suffisant pour entreprendre une telle démarche.

Afin de diminuer la variabilité des résultats, nous avons limité le domaine de validité de l'étude en nous fixant au départ un certain nombre de conditions de milieu et de culture.

L'étude de l'enracinement de chaque plante a été réalisée sur un seul type de sol, le plus représentatif de l'étendue de la culture au Sénégal : sol ferrugineux tropical sableux peu ou pas lessivé (Dior) pour l'arachide et le mil, sol brun à engorgement temporaire partiel sabla-argileux (Dek) pour le sorgho, sol ferrugineux tropical sablo-argileux lessivé (sol beige) pour le riz pluvial.

Les propriétés physiques du sol sont représentatives de celles rencontrées habituellement sur le type de sol considéré. Les différents sols étudiés se caractérisent d'ailleurs par une relative homogénéité verticale et horizontale (surtout les sols dek et dior).

L'étude portant sur des plantes cultivées sous pluie sans irrigation, l'humidité du sol est nécessairement très variable et c'est une cause d'hétérogénéité de la croissance racinaire. Toutefois, les résultats des prélèvements n'ont été retenus que lorsque l'humidité était suffisante pour ne pas constituer, une barrière à la croissance des racines, notamment en profondeur.

Les propriétés chimiques des terrains choisis sont, elles aussi, représentatives de conditions moyennes du type de sol considéré. La teneur en éléments nutritifs peut être variable, mais grâce à la fertilisation, il est peu probable que cela puisse être un facteur limitant -Emportant de la croissance racinaire.

Par ailleurs, nous nous sommes toujours placés dans des terrains dont le pH est supérieur à 5 pour que les problèmes de toxicité aluminique ne se posent pas.

L'étude des systèmes racinaires a toujours eu lieu pendant la saison normale (des cultures (saison des pluies), sans irrigation.

Les cultures ont été conduites suivant les techniques préconisées par les services de vulgarisation, en particulier : fumure appliquée sur la culture étudiée, et au moins sur le précédent de la culture (sauf en cas de précédent jachère) ; semis à bonne date, démariage précoce des C:éerales, contrôle parfait des mauvaises herbes.

Le travail du sol, en modifiant nettement les propriétés physiques de la couche travaillée (CHARREAU et NICOU, 1971 ; NICOU, 1974-1977) a une incidence importante sur la densité racinaire et sur les rendements des parties aériennes (NICOU et THIROUIN, 1968 ; CHOPART, MAUBOUSSIN et NICOU, 1970 ; CHOPART, 1975 ; CHOPART et NICOU, 1976 ; NICOU, 1977). Le labour est donc, une technique fortement conseillée par la recherche. Or, le travail du sol est encore à peu près inconnu au Sénégal, même sur les terrains fertilisés, à cause

de différentes contraintes agronomiques au niveau de l'exploitation (NICOU, 1975 ; CHOPART, 1978). C'est pourquoi, nous avons décidé d'étudier l'enracinement avec et sans labour pour nous situer dans les conditions habituelles de culture et celles qui peuvent être souhaitées.

En résumé, Les résultats présentés dans cette étude ont tous été obtenus dans des conditions de sol, de climat et de culture suivantes :

- sol dior pour l'arachide et le mil, dek pour le sorgho et beige pour le riz pluvial, humide sur une profondeur supérieure à celle de l'enracinement, fertilisé et de pH > 5,

- plantes dont le développement est bon ou moyen, cultivées sous pluies, sans irrigation, avec les techniques agronomiques préconisées et dans les conditions de climat de la saison des pluies.

Bien sûr, les résultats et conclusion ne pourront s'appliquer sensu stricto, qu'aux conditions ainsi définies.

Toutefois, celles-ci correspondent généralement à celles de l'expérimentation, et, si le paysan applique les techniques préconisées, Les résultats peuvent aussi intéresser de larges superficies cultivées.

V. - CONCLUSION

Au Sénégal, la pluviométrie est souvent insuffisante et surtout irrégulière et Les sols sableux sont pauvres en éléments nutritifs mais ils sont très profonds. Le rôle joué par le système racinaire semble donc particulièrement important. Il doit pouvoir pallier Les faibles disponibilités en eau et en éléments minéraux par une bonne prospection du milieu. Il paraît donc indispensable de tenir compte de l'enracinement dans différents domaines de l'agronomie.

Or, la morphologie et la croissance des systèmes racinaires des principales cultures du Sénégal étaient très peu connues jusqu'à maintenant, ce qui justifie les travaux entrepris.

L'étude en plein champ des systèmes souterrains des plantes pose cependant un certain nombre de problèmes méthodologiques que nous avons dû d'abord examiner pour choisir ou mettre au point des méthodes adaptées aux buts recherchés.

DEUXIEME PARTIE

MATERIEL VEGETAL ET METHODES D'ETUDE UTILISES

I. - INTRODUCTION

La morphologie des organes souterrains des plantes a été généralement moins complètement étudiée que celle des organes aériens, surtout lorsque les plantes sont cultivées sur leur substrat habituel. Le sol. L'explication provient en partie des difficultés d'accès à ces organes et de leur caractérisation.

Malgré cela, de nombreuses méthodes, ont été proposées qui ont chacune leur intérêt et leurs défauts.

Nous avons dû choisir parmi elles, celles qui paraissaient convenir le mieux au type de plante étudiée, à nos conditions de milieu, de travail, et au but recherché. Nous avons aussi été amené à adapter ou à mettre au point des méthodes de prélèvement et de caractérisation des systèmes racinaires.

Cependant, la mise au point ou l'introduction de certaines méthodes n'ont pu se faire qu'après le début des travaux, il y a 10 ans. C'est ce qui explique une certaine évolution des techniques utilisées, vers une plus grande précision et surtout une caractérisation plus fine des systèmes racinaires.

Les travaux ont porté exclusivement sur des plantes cultivées en plein champ, pour que les conclusions soient plus directement utilisables. Une très grande majorité des résultats provient de prélèvements de racines à différents stades de végétation, suivis d'une caractérisation de plusieurs paramètres racinaires grâce à des techniques de Laboratoire. Quelques mesures et observations ont toutefois eu lieu directement sur le terrain, surtout en début de cycle.

Lorsque cela était possible, Les résultats ont été traités statistiquement, notamment par des ajustements à des fonctions mathématiques des courbes de croissance obtenues.

II. ■ LE MATERIEL VEGETAL

Pour trois des quatre **espèces** étudiées, l'arachide, le sorgho et le riz, il existe au Sénégal d'assez nombreuses variétés traditionnelles ou améliorées, adaptées aux différents **types** de milieu. Dans le cas du mil, il n'y a actuellement que deux types de populations distinctes dont l'une des deux domine largement ; le choix de la variété de mil a donc été facile.

Pour les trois autres espèces, il n'était pas possible d'étudier chacune des variétés. On a décidé de ne retenir que deux ou trois variétés sélectionnées vulgarisées ou en pré-vulgarisation parmi les **plus productives** dans le type de milieu où nos expérimentations ont eu lieu.

2.1. ■ L'arachide

L'arachide (*Arachis hypogea*) est une légumineuse annuelle d'origine américaine à feuilles pennées avec deux paires de folioles opposées. Les inflorescences se présentent comme des épis de 3 à 5 fleurs. L'ovaire, après fécondation, a la particularité d'être porté en terre par le développement d'un gynophore. Le fruit (gousse) se développe et mûrit dans le sol entre 3 et 5 cm de profondeur. Chez les variétés hâtives, il existe aussi des fleurs souterraines.

La hauteur de la plante est toujours faible, de 20 à 40 cm ; le port peut être rampant ou érigé.

Au Sénégal, Les cycles varient entre 90 et 120 jours suivant les zones de culture. On a étudié trois variétés, à port érigé, sélectionnées au CNRA de Bambey et actuellement vulgarisées :

- 55-437 et 73-30 de type spanish, de cycle de 95 jours,
- 57-422 de type virginia, de cycle de 105 jours.

Les correspondances entre le nombre de jours après le semis et les stades végétatifs dans ces conditions moyennes de saison des pluies au Sénégal figurent dans le tableau n° 1.

Tableau n° 1 : Principales étapes de la croissance et du développement des variétés d'arachide étudiées (en nombre de jours après le début de la germination)

Variétés	Levée	Début floraison	Fin de la floraison utile	Maturation de la majorité des gousses Récolte
55-437 73-30	3	20	45-50	95
57-422	3	23	55-60	105

La floraison débute tôt et elle est très étalée. En fait, la floraison utile s'arrête vers la moitié du cycle ; les fleurs qui apparaissent par la suite ne représentent qu'un faible pourcentage du total et les gousses formées n'ont pas le temps d'atteindre la maturité complète au moment de la récolte.

2.2. - Le mil

Le mil pénicillaire (*Pennisetum typhoides*) est une graminée céréalière annuelle, d'origine africaine (probablement d'Afrique de l'Est) et cultivée depuis très longtemps en Afrique de l'Ouest.

C'est une plante de haute taille à fort tallage. L'épi est en forme de chandelle, les grains sont de très faibles dimensions (poids de 1000 grains : 8 grammes environ).

Au Sénégal, il existe deux sortes de mil :

- mil tardif "Sanio". Le cycle est de 120 à 150 jours, il est surtout cultivé dans les zones méridionales plus pluvieuses. Sa taille est très élevée, 3 à 4 mètres. Il est sensible à la photo-période et ne fleurit que lorsque les jours deviennent plus courts, en octobre, au moment de la fin des pluies. Sa culture est en nette régression au profit du mil hâtif et du sorgho.

- mil hâtif "Souna". Son cycle est de 90 jours, sa taille est de 2 mètres environ, le tallage est abondant ; la floraison débute vers le

60^{ème} jour. Les principales étapes de sa croissance et du développement du mil figurent dans Le tableau n° 2.

Seul., l'enracinement de la variété **Souna III** de ce type de mil, de très loin le plus commun, a été étudié. Il s'agit d'une variété synthétique sélectionnée au CNRA de Bambeý à partir de populations locales.

Tableau n° 2 : Correspondances entre les stades de végétation et le nombre de jours après Le semis sur Les trois céréales étudiées (mil, sorgho, riz pluvial)

Espèce	Variété	Levée	Début tallage	Initiation paniculaire	Début épisaison	Début floraison	Récolte
Mil	Souna III	1 à 2	15	35	52	57	90
Sorgho	63-18	2	20		70	75	110
Sorgho	Congossane	2	25		95	100	140
Riz pluvial	I Kong Pao	2 à 3	15 à 20	55 (env.)	75	78	110
	63-83	2 à 3	15 à 20	60 (env.)	85	88	115-120
	Iguape cateto	2 à 3	15 à 20	60 (env.)	85	88	120

2.3. ■ Le sorgho

Le sorgho (*sorghum vulgare*) est, comme le mil, une graminée céréalière d'origine africaine. Il s'agit aussi d'une plante de taille élevée, au moins pour les variétés traditionnelles, et à tallage fort ou moyen. Les panicules sont de forme et de taille très variables. Les grains sont oblongs, globuleux comme le mil, mais nettement plus gros. Leur couleur et leur texture sont variées. Il existe en fait maintenant de très nombreuses variétés de caractéristiques très différentes répandues dans plusieurs parties du monde. En Afrique, le sorgho est essentiellement destiné à l'alimentation humaine.

Nous avons étudié L'enracinement de deux variétés sélectionnées (sélection CNRA Bambey):

- Congossane : variété de type traditionnel de haute taille (4 à 5 m), à cycle Long (140 jours), à panicules Lâches,
- 63-18 : variété de taille moyenne (1,80 m), à cycle court (110 jours:) et à panicules compactes.

Comme pour Le mil, Les principales étapes de La croissance et du développement du sorgho figurent dans Le tableau n° 2.

2.4. -- Le riz pluvial

Le riz (*Oryza*) comprend deux espèces principales :

- *Oriza glaberrima* d'origine africaine très peu cultivée,
- *Oriza sativa* d'origine indienne, maintenant répandue dans toutes Les régions chaudes du monde.

La très grande majorité de La production rizicole mondiale provient de plantes cultivées en zone inondée avec une lame d'eau plus ou moins permanente. Mais il est aussi possible, pour certaines variétés, de cultiver la plante en sol exondé : c'est La riziculture pluviale (ou de montagne), qui occupe des surfaces appréciables en Afrique.

Au Sénégal, Le riz pluvial n'occupe encore qu'une place modeste dans La production céréalière du pays, mais elle doit être amenée à devenir plus importante.,

Les variétés de riz pluvial ont des caractéristiques morphologiques assez comparables à celles des variétés aquatiques, mais elles sont plus tolérantes à La sécheresse.

Nous avons étudié L'enracinement de trois variétés sélectionnées choisies parmi Les meilleures au moment de L'expérimentation, tout en présentant des caractéristiques assez différentes (tableau n° 2) :

- 63-83, genre indica, taille 120 cm, grain Long, cycle 115 à 120 jours, sélectionné au Sénégal,

- I KONG PAO, genre indica, taille 80 à 85 cm, grain court, cycle de 110 jours, originaire de Taiwan,

- IGUAPE CATETO, genre indica, taille 120 cm, grain long, cycle de 120 jours, originaire du Brésil.

En fait, grâce à une importante pression de sélection sur Le riz pluvial en Afrique depuis quelques années, ces variétés sont déjà plus ou moins remplacées par d'autres plus performantes, et il conviendrait de comparer Les résultats obtenus avec L'enracinement de ce nouveau matériel.

III. ■ CONDITIONS GENERALES D'EXPERIMENTATION ■ DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

3.1. ■ Dispositifs expérimentaux ■ Traitements

L'étude de L'enracinement a toujours eu Lieu en conditions naturelles sur des champs d'expérimentation.

Nous avons eu recours à trois types de support :

- des parcelles spécialement conçues pour L'étude de l'enracinement, sur des terrains de culture **avec** Le précédent habituel de La culture considérée, généralement de dimensions moyennes et sans répétition,

- des dispositifs expérimentaux plus complexes, pluriannuels destinés à étudier L'effet des techniques **culturelles**, et du travail du sol en particulier. Une partie des parcelles est consacrée aux prélèvements **racinaires**, il s'agit d'essais en blocs de Fisher, avec 4 à 6 répétitions,

- des grandes parcelles de multiplication ou d'étude des structures d'exploitation, en culture continue depuis plusieurs **années**.

L'utilisation de ces deux derniers types de support pour Les études racinaires présente l'inconvénient de perturber Le terrain Lors des prélèvements, ce qui peut gêner La conduite de L'expérimentation agronomique, si L'on ne **prend^{pas} certaines** précautions. Cela présente par contre [l'avantage, du point de vue de L'étude de L'enracinement, de placer Les plantes dans un milieu généralement bien connu et représentatif des conditions habituelles de **culture**.

Sauf quelques cas particuliers explicités plus loin, les prélèvements racinaires ont toujours été réalisés sur des traitements avec et sans labour, toutes conditions étant égales par ailleurs. Les travaux sur Le sorgho et le riz pluvial l'ont été sur le premier type de support ; le mil et l'arachide surtout sur le second et le troisième.

3.1.1. - Le sorgho

L'enracinement du sorgho a été étudié à Bambey (sol dek) en 1969.

Le dispositif, conçu spécialement à cet effet, comprend trois parcelles de 18 x 20 m, séparées par des allées de deux mètres et entourées d'autres cultures.

Les deux premières parcelles sont cultivées avec la variété 63-18 avec et sans labour, la troisième avec la variété Congossane avec labour. Sur le témoin, le travail du sol s'est limité à un grattage sur 3 à 5 cm ; le labour a été réalisé en début de cycle en traction bovine sur une profondeur de 20 cm environ.

Le semis est réalisé en poquets avec des écartements de 1 x 1 m. Un premier démarrage à 3 pieds a lieu 15 jours après le semis, puis un second à un pied 10 jours après. Cette densité de semis est légèrement inférieure à celle utilisée habituellement (poquets espacés de 1 x 0,5 m), mais elle facilite les prélèvements et la comparaison des résultats avec ceux du mil semé à cette densité. La culture, grâce à un tallage un peu plus important, a d'ailleurs donné des rendements de 35 q/ha sur labour, très bons pour la zone.

3.1.2. - Le riz pluvial

L'étude a été réalisée à Séfa (Casamance) en 1970 et 1973 sur sol rouge. En 1970, le dispositif comprend six parcelles sans répétition de 15 x 20 m séparées, par des allées de deux mètres. Les trois variétés 1 KONG PAO, 63-83, et IGUAPE CATETO sont cultivées selon deux modalités de travail du sol : grattage superficiel sur 5 à 8 cm ou labour de début de cycle au tracteur sur une profondeur de 20 cm environ. La fertilisation est composée d'un épandage de 250 kg/ha d'engrais composé 7-17-24 au semis et de 50 kg/ha d'urée le quinzième jour.

Chaque parcelle est subdivisée en deux : sur une partie, le riz est semé en poquets de 0,3 x 0,3 m (11 pieds par m²) ; sur l'autre, Le riz est semé en lignes avec 0,4 m entre chaque ligne.

En 1973, le dispositif est le même ; seule la superficie des parcelles a varié (6 x 9 m).

3.1.3. - Le mil et l'arachide

Les enracinements du mil et de l'arachide ont été étudiées à Bambeby sur soldior, et en grande partie sur les mêmes expérimentations agronomiques pluriannuelles en rotation arachide-mil. L'arachide a été entièrement étudiée entre 1977 et 1979, sauf un prélèvement réalisé en 1970 sur les 61 au total.. L'étude de L'enracinement du mil s'est échelonnée entre 1971 et 1979.

C'est seulement pour faciliter l'exploitation des données que l'on a conservé tes noms initiaux des essais agronomiques qui ont servi de support. La dénomination n'a souvent aucun rapport avec l'objet de la présente étude.

Ces expérimentations sont les suivantes :

- "Parcelle enracinement arachide" en 1970 : une parcelle de 10 x 10 m, arachide variété 55-437 avec labour,
- "Labour date de semis" en 1971 : dispositif en blocs 6 répétitions avec 2 séries, parcelles de 6 x 20 m, culture de mil avec et sans labour,
- "Reprise de Labour" en 1975, essai en bandes, quatre répétitions, culture de mil uniquement avec labour,
- "Structure dior" culture de mil en 1976 et d'arachide en 1977 sur un champ de 2,5 hectares à l'intérieur d'une exploitation théorique en station de 10 hectares pour des études agro-économiques et de matériel,
- "Mulch labour minimum tillage" de 1976 à 1979, dispositif en blocs avec six répétitions ; parcelles de 9 x 15 m. L'essai est composé de deux séries comprenant des traitements avec et sans labour. Des prélèvements de racines de mil ont été effectuées en 1976, 1978 et 1979, et d'arachide en 1977 (variété 55-437), 1978 et 1979 (variété 73-30),

■ "Labours retardés" en 1979, dispositif en blocs avec quatre répétitions. Les parcelles de 9 x 15 m sont cultivées en mil,

■ "Essai AIEA" en 1979, essai sous contrat avec l'AIEA (Agence Internationale pour l'Energie Atomique). Les quatre parcelles, en arachide (variété 73-30) sont cultivées uniquement avec labour, mais elles sont situées à proximité immédiate de l'essai enracinement arachide précédent.

Tous les dispositifs ont en commun :

■ le même précédent (arachide pour le mil, et mil pour l'arachide) sauf mulch labour 1976 (précédent jachère),

■ Ca densité de semis. Le mil est semé en poquets espacés de 1 m x 1 m, démarriés à trois pieds entre le dixième et le quinzième jour. L'arachide est semée mécaniquement en lignes espacées de 0,45 m pour les variétés hâtives 73-30 et 55-437 et de 0,60 m pour la variété semi-hâtive 57-422,

■ la fertilisation : 150 kg/ha de 8-18-27 pour l'arachide et 150 kg/ha de 10-21-22 au semis pour le mil avec apport complémentaire de 100kg/ha d'urée en cours de végétation,

■ le semis à la date la plus propice (en juin ou juillet suivant les années) et le contrôle parfait de l'enherbement,

■ le travail du sol, réalisé en traction bovine sur une profondeur de 17 à 20 cm, sur les traitements labourés.

3.2. ■ Conditions de milieu des expérimentations

3.2.1. ■ Pluviométrie, conditions hydriques

La pluviométrie mensuelle et totale à proximité immédiate de chacune des expérimentations est présentée au tableau n° 3.

Des contrôles de l'humidité du sol ont été effectués régulièrement au cours du cycle par gravimétrie ou par utilisation d'un humidimètre à neutrons (MAERTENS, MORIZET et STUDER, 1975 ; DAUDET et VACHAUD, 1977), ce qui a permis de suivre les conditions hydriques de la croissance racinaire dans le

Tableau n° 3 : Pluviométrie mensuelle et totale sur les terrains d'expérimentation (en mm)

Lieu	Année	Localisation	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Total
SARREBOURG	1969	Enracinement s r ho (jardin (botanique)	-	110,8	226,2	199,3	103,8	646,1
	1970	Enracinement arachide (Sol I T)	0,5	196,6	195,1	138,6		566,8
	1971	Labour dates de semis de mil (Sol II Nord)	58,7	165,9	164,1	163,9	3,9	574,5
	1972	Labour dates de semis de mil (Sole II Nord)	66,0	50,4	162,5	125,1	45,4	399,4
	1973	Reprise labour mil (Sole II Nord)	-	155,3	191,4	156,8	9,6	523,1
	1975	Structure Dior mil (Sole I Nord)	-	95,0	107,7	158,6	41,6	402,9
	1976	Mulch labour mil (Sole II nord)	-	92,4	119,0	130,8	36,9	349,1
	1977	Structure Dior (Sole I Nord)	8,7	75,2	150,7	127,7	59,1	421,4
		Mulch labour mil [Sole II Nord)	8,0	84,7	161,0	125,0	38,7	417,4
	1977	Mulch labour arachide (Sole II Nord)	8,3	82,8	148,8	129,7	46,0	417,6
	1978	Mulch labour mil (Sole II Nord)	11,3	95,0	222,9	365,2	33,5	727,9
		Mulch le 3cm r arachide (Sole III Nord)	9,3	95,7	233,7	348,7	33,1	720,5
	1979	Mulch labour mil	114,5		123,4	119,3	23,3	472,5
		A. r l. ce si d e			123,4 114,5	119,3 92,0	23,3	472,5
	1979	(r: chide)		92,0 114,5	123,4	119,3	23,3	472,5
Labours retardés en mil		5	92,0 114,5	123,4	119,3	23,3	472,5	
SA	1970	Enracinement riz pluvial	75,9	268,5	340,4	213,2	26,9	854,9
	1973	Enracinement riz pluvial	107,5	249,4	407,7	184,5	45,1	954,2

sol, et éventuellement d'éliminer certains prélèvements Lorsque La teneur en eau citait trop basse et pouvait perturber La croissance (humidités inférieures au pF 4,2).

Les principales autres caractéristiques climatiques ont aussi été mesurées au niveau des postes météorologiques des stations de Bambey et de Séfa : température, ETP, radiation solaire. Elles sont globalement représentatives des conditions moyennes publiées par ailleurs (CHARREAU et NICOU, 1971 ; DANCETTE, 1976 ; HALL et DANCETTE, 1979).

3.2.2. - Les sols

Les principales caractéristiques physiques du sol mesurées sur les terrains d'expérimentation figurent au tableau n° 4. Les mesures de La teneur en éléments fins, de pF 4,2, de pH et de carbone ont été réalisées suivant Les techniques classiques. La densité apparente a été mesurée avec un densitomètre à membrane.

Le sol "dior" de Bambey sur lequel ont été cultivés l'arachide et le m-il, est un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé, très sableux avec une forte proportion de sables fins (100 à 200 μm). La fraction argileuse ($<2 \mu\text{m}$) est essentiellement constituée de kaolinite. Le sol, profond, est formé sur matériau sableux quaternaire de 2 à 10 m d'épaisseur, d'origine éotienne ; il recouvre du calcaire et des marnes tertiaires. La perméabilité est élevée : à 10 % d'humidité, la conductivité hydraulique est de 100 mm/jour environ (HAMON, 1978), et le drainage est très bon.

A Bambey, Le sol "dior" occupe Les parties hautes ou moyennes d'un modelé dut-taire atténué. Dans les interdunes, où le sédiment quaternaire est plus argileux et Le calcaire plus près de la surface, on trouve Le sol "dek" classé comme sol brun, à engorgement temporaire partiel. sur lequel a été cultivé le sorgho. C'est un sol un peu plus argileux : l'argile est composée pour 40 % de montmorillonite et 55 % de kaolinite (BONFILS et FAURE, 1955) ; il a une capacité de rétention de l'eau supérieure à celle du sol dior et la conductivité hydraulique y est nettement plus faible (HAMON, 1978).

A Séfa, Le sol beige sur lequel a été cultivé Le riz est classé dans Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à tâches et concrétions. La texture est sablo-argileuse en surface mais augmente régulièrement avec La

Tableau n° 4 : Principales caractéristiques physiques du sol sur les terrains d'expérimentation

Localisation	Nom de l'essai	Profondeur (cm)	A+L	m _{4,2}	pH	C	Densité apparente
A	Parcelles rondes sorgho	0 - 20	8,3		7,1		1,49
		20 - 40	7,4		7,0		
		40 - 100	11,9		6,7		
	Recommande de se les	0 - 20	8,2	2,5	5,0	3,1	1,54
		20 - 50	8,3	3,5	5,9		
		50 - 100	10,8	4,0	6,1		
		100 - 150	10,4	4,0			
	Remise la leur	0 - 20	4,8		5,4	2,2	1,54
		20 - 40	5,8		5,5	1,7	
		40 - 60	6,0		5,8		
	Structure Dior	0 - 20	4,5	4,8	5,6	2,3	
		20 - 50	7,5	5,0	5,7		
		50 - 90	7,8	4,4	6,1		
		90 - 150	8,1	4,8	6,7		
		150 - 200	8,0	5,2			
Mulch Labour Série I	0 - 20	5,5	2,4	5,9	2,5	1,57	
	20 - 40	6,5	2,8	5,9	2,3	1,60	
	40 - 100	9,0	2,8	6,2			
	100 - 160	10,1	3,2	6,4			
	160 - 200	9,7	3,4				
Mulch Labour Série II	0 - 20	5,5	2,0	5,6	2,9	1,55	
	20 - 40	5,1	1,6	5,2	1,9	1,58	
	40 - 100	6,3	1,3	5,7			
	100 - 150	5,1	1,7	5,8			
	160 - 200	7,3	2,3	5,9			
Labours retardés	0 - 20	4,9	1,8	5,8	2,8	1,56	
	23 - 40	6,1	1,6	5,4	1,7	1,57	
	40 - 100	7,2	1,8	5,8			
	100 - 150	8,2	2,3	5,8			
	160 - 200	7,8	2,3	6,0			
Essai A.I.E.A. + Parcelles enracinement racide	0 - 20	6,8		5,3	2,9	1,57	
	20 - 80	8,5		5,2			
	80 - 160	8,1		5,4			
	160 - 200	8,7		5,7			
Essai enracinement ris pluvial Séfa.	0 - 20	17,4		5,2		1,55	
	20 - 40	27,4		5,2			

profondeur dans le premier mètre pour atteindre 40 %. L'argile est essentiellement constituée de kaolinite. Le drainage est généralement déficient, du fait de la faible conductivité hydraulique en profondeur : entre 80 et 130 cm, elle n'est que de 5 mm/jour lorsque le sol contient 30 % d'eau. La structure est peu développée.

Les trois sols se caractérisent par leur grande profondeur et aussi par l'absence presque totale d'éléments de taille supérieure à 2' mm.

IV. -- TECHNIQUES D'ETUDE DE L'ENRACINEMENT

L'étude in situ de la morphologie et de la croissance des systèmes racinaires des plantes cultivées présente un certain nombre de difficultés.

Les systèmes racinaires sont en contact étroit avec le milieu, et les racines des plantes annuelles sont fines et fragiles. Pour y avoir accès, on est obligé au préalable de séparer avec soin les racines du sol, soit directement sur le terrain, soit au laboratoire après avoir prélevé des volumes ou des poids de terre connus et variables suivant les techniques.

Or la variabilité du développement des parties aériennes des plantes cultivées en pleine terre est généralement importante lorsque l'on mesure des plantes prises par individu ou sur une faible surface. Cela est encore plus vrai pour les parties souterraines qui subissent plus directement l'influence de l'hétérogénéité du sol. Pour travailler avec autant de précision que dans les études sur la croissance et la morphologie des parties aériennes, on devrait donc prélever des volumes de sols très élevés, ce qui nécessiterait des moyens extrêmement importants.

C'est pourquoi les méthodes d'étude des systèmes racinaires qui ont été utilisées par différents auteurs sont nombreuses, car elles correspondent à des moyens et à un degré de finesse des résultats recherchés variables. On doit aussi tenir compte de la morphologie de l'espèce étudiée.

Un certain nombre de travaux ont passé en revue les différentes méthodes d'étude des systèmes racinaires développés dans le sol (SCHUURMAN et GOODEWAGEN, 1965 ; WHITTINGTON, 1969, BALDY, 1973). Nous nous limiterons donc à une présentation rapide des principales catégories de méthodes disponibles

pour l'étude des systèmes racinaires des plantes de type herbacé. Celles que nous avons réellement utilisées seront ensuite décrites de manière plus détaillée dans Le paragraphe suivant.

4.1. - Revue bibliographique sommaire des méthodes d'étude de l'enracinement des plantes herbacées cultivées en pleine terre

Les méthodes peuvent être séparées en deux grandes catégories :

4.1.1. - Méthodes n'utilisant pas d'éléments radioactifs

Il s'agit d'observations directes, ou de prélèvements de sol contenant des racines qui sont ensuite extraites.

L'observation directe se fait Le plus souvent à partir d'une tranchée creusée dans Le sol, après déterrage partiel des racines. Cette technique a d'abord été utilisée par WEAVER (1919), puis reprise et largement développée par HENIN CHENIN et coll., (1960) ; elle donne des informations essentiellement qualitatives sur Le développement du système racinaire, et permet en particulier d'étudier les relations entre le profil cultural et le profil racinaire et de faire un diagnostic sur l'état physique du sol.

Les méthodes de prélèvements de racines à partir d'échantillons de sol sont assez variées.

Beaucoup d'études quantitatives sur les systèmes racinaires ont été réalisées par prélèvements, à différentes profondeurs, de carottes de sol de volume ou de poids connu suivis de L'extraction des racines par lavage., Différents matériels et appareils de prélèvement d'échantillons et de déterrage des racines ont été décrits (MAERTENS, 1964 ; SCHUURMAN et GOEDEWAGEN, 1965 ; BONZON et PICARD, 1969).

Ces méthodes sont relativement Légères, perturbent peu le sol et permettent donc de multiplier les répétitions ; elles sont donc bien adaptées à des comparaisons statistiques de traitements sur une expérimentation. Cependant, dans Le cas de plantes semées à grands écartements, i L peut se poser un problème de gradients en fonction de la distance par rapport au pied, et Les résultats dépendront de La Localisation des prélèvements, ce qui rend difficile la détermination des productions de racines par plante ou par m^2 .

Afin d'avoir des valeurs plus facilement représentatives des caractéristiques moyennes de l'enracinement des plantes, certains auteurs ont réalisé des prélèvements de volumes de sol plus importants contenant un ou plusieurs individus du végétal à étudier. On peut ainsi découper en tranches horizontales un monolithe de sol (LEE, 1927). Les différents échantillons sont portés au laboratoire pour séparer les racines de la terre par lavage. Cela permet d'intégrer les gradients horizontaux, et, grâce au gros volume de sol prélevé, d'avoir une évaluation plus précise du développement des racines en profondeur, en particulier au niveau du front racinaire.

Cette méthode est cependant nettement plus lourde que celles utilisant des carottages de faible volume.

Pour avoir une meilleure image de la morphologie du système racinaire dans le sol, des méthodes ont été mises au point qui consistent à appliquer sur la paroi d'une tranchée verticale creusée dans le sol une planche garnie de pointes qui pénètrent dans celui-ci. Après dégagement de l'ensemble planche + sol contenant des racines, on procède à leur extraction par lavage, celles-ci restant maintenues dans les pointes. Cela permet de conserver le système racinaire dans une position proche de celle qu'il avait dans le sol et de faire des observations sur sa morphologie et sa répartition (MASCHHAUPT, 1915 ; SCHURMAN et GOEDEWAGEN, 1965 ; BONZON et PICARD, 1969). Cette méthode est cependant très délicate à mettre en oeuvre et nécessite un matériel important, en particulier pour appliquer la planche et sortir le monolithe de sol de la tranchée, car celui-ci est généralement très lourd.

La caractérisation des échantillons de racines extraits du sol par ces différentes méthodes peut être réalisée en utilisant plusieurs critères. Le plus ancien et le plus courant est le poids de matière sèche. Ce critère est facile à mesurer, il permet en particulier de faire des comparaisons entre la masse des parties aériennes et celle des racines. Il est cependant peu indiqué pour les études des relations entre l'alimentation hydrique et minérale (COWAN, 1965 ; BARLEY, 1970).

A cet égard, d'autres mesures semblent s'avérer plus intéressantes : il s'agit de la longueur totale des racines (NEWMAN, 1965), de la surface diamétrale (BONZON et PICARD, 1969), de la distance moyenne entre les racines

(MAERTENS, 1974) et du diamètre moyen calculé à partir de La surface diamétrale et de la Longueur. Tous ces différents critères ont été utilisés dans cette étude et seront examinés plus loin.

4.1.2. ~ Méthodes basées sur l'utilisation des éléments radioactifs

Au Sénégal, les méthodes radioactives n'ont pas pu être utilisées jusqu'à maintenant pour les études des systèmes racinaires ; c'est pourquoi nous ne ferons que Les citer rapidement.

L'élément radioactif peut être introduit dans les parties aériennes ou placé dans le sol.

La première technique utilisée surtout le ^{32}P ou le ^{14}C qui, après injection dans les parties aériennes, migre dans l'ensemble des organes vivants de la plante, y compris les racines. Celles-ci sont ensuite prélevées suivant des méthodes déjà décrites (carottes). On peut alors distinguer les racines vivantes de celles qui ne le sont pas (RACZ, RENNIE et HUTCHEON, 1964 ; SINGH et COLEMAN, 1974).

L'autre catégorie de techniques consiste à injecter dans Le sol un produit radioactif à une profondeur déterminée (RACZ, RENNIE et HUTCHEON, 1964 ; KAFKAFI et al, 1965 ; REYNIERS et al, 1979). On observe, par comptage de la radioactivité des parties aériennes, s'il y a eu absorption ou non de l'élément introduit ; cela permet de détecter la présence de racines vivantes à proximité immédiate du point de localisation sans avoir à prélever de racines.

En injectant l'élément radioactif à différentes profondeurs et à différentes distances des pieds, on peut ainsi évaluer l'extension du système racinaire notamment en profondeur.

Les techniques d'étude de l'enracinement sont donc nombreuses et variées. Elles ont chacune leurs qualités et leurs défauts. Certaines d'entre elles, comme les méthodes radioactives, n'ont pu être utilisées par manque de matériel, et ne répondent que partiellement aux objectifs de l'étude. D'autres, comme la méthode de la planche à clous ont été testées mais ont posé des problèmes importants dans nos conditions et avec le matériel dont nous disposions ; elles ont rapidement été abandonnées.

4.2. -- Techniques de prélèvements utilisées

Les méthodes d'étude de l'enracinement utilisées correspondent donc aux méthodes non radioactives. Elles sont basées essentiellement sur plusieurs techniques de prélèvement de sol contenant des échantillons de racines. On procède ensuite à une caractérisation de différents paramètres morphologiques après lavage des échantillons sur un tamis qui recueille les racines et laisse passer la terre.

Les volumes des échantillons prélevés sont variables suivant la morphologie de la plante. La plus grande partie des prélèvements réalisés correspond à des prises de gros volumes de sol (contenant l'ensemble du système racinaire d'une ou plusieurs plantes (prélèvements globaux)). Cependant, pour le riz pluvial semé à forte densité et où les problèmes de gradients se posent donc moins, nous avons eu aussi recours à la méthode des prélèvements par carottages. Enfin, en tout début de cycle, lorsque le système racinaire est encore très peu développé, nous avons procédé à des observations directes et à des mesures à partir d'une tranchée pour suivre les premiers stades de la croissance.

Nous avons donc utilisé à la fois une méthode d'étude directe et deux types de prélèvements des racines : par carottages et par prélèvements de gros volumes de sol (monolithes:).

4.2.3. - Observations et mesures directes sur tranchée

Il s'agit de la méthode du profil cultural (HENIN et al, 1960). On creuse une tranchée verticale à proximité du pied, et, à l'aide d'un couteau, on dégage avec précaution les racines qui apparaissent sur la paroi, pour faire ensuite des observations. Cette technique a été utilisée en tout début du cycle des plantes lorsque le système racinaire est encore très peu développé. On peut alors dégager la quasi-totalité de celui-ci pour faire des observations et des mesures sur son extension dans le sol.

4.2.2. - Prélèvements par carottages

Cette technique a été utilisée uniquement sur le riz pluvial. En raison de la forte densité de semis et de la morphologie des racines, superficielles mais colonisant bien l'horizon de surface, le riz pluvial se prête

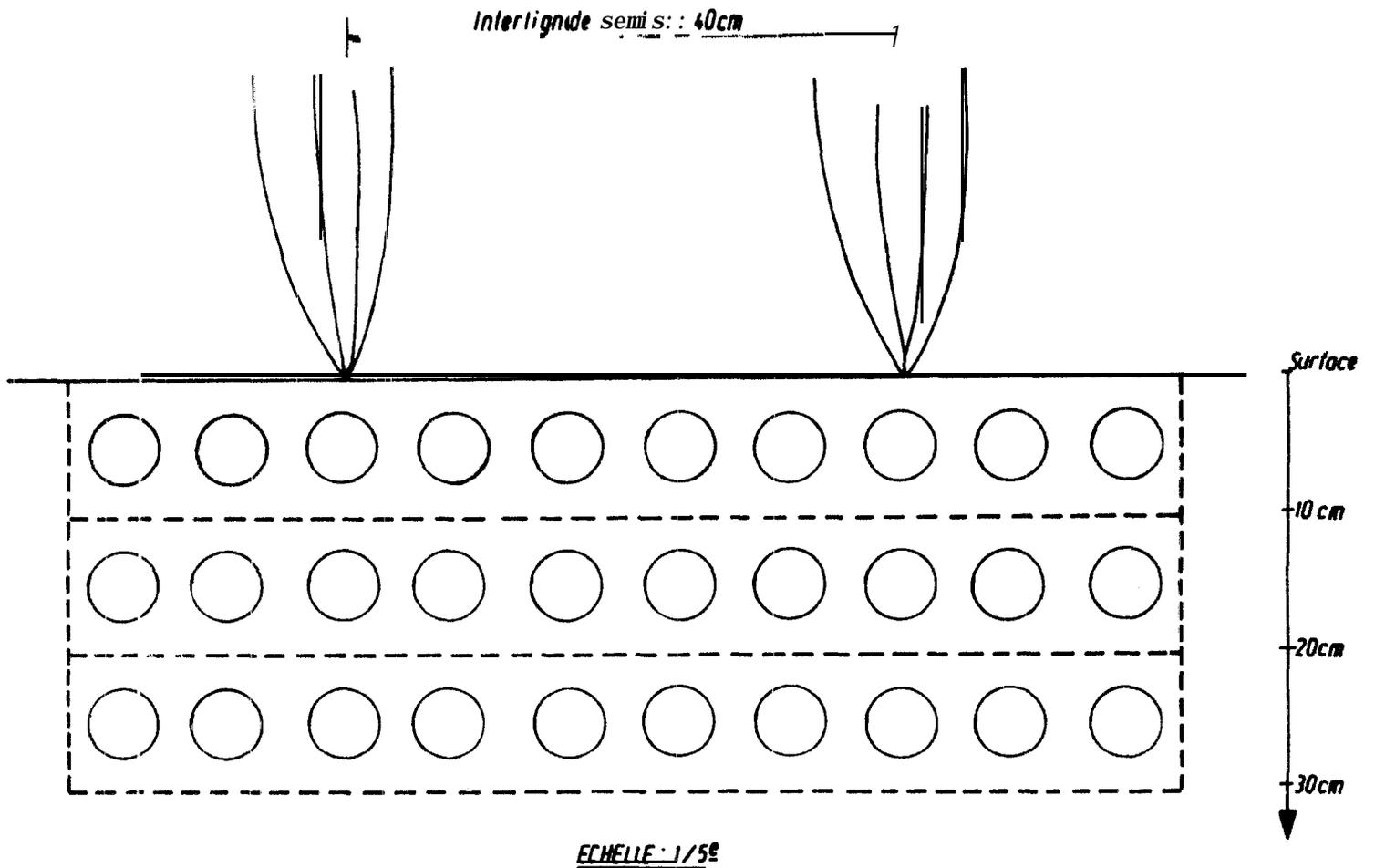


Fig.n° 1 : Méthode de prélèvement des racines de riz par carottages:vue de face de la paroi d'une fosse avec les emplacements des cylindres

mieux que les autres plantes étudiées, à l'obtention de résultats représentatifs suivant cette méthode qui ne prélève qu'un faible volume de l'enracinement. Son avantage principal est de permettre de multiplier les répétitions. En bordure d'un **piéd**, on creuse une tranchée verticale perpendiculaire à la ligne de semis, puis on enfonce horizontalement des cylindres **métalliques** de 150 cc (5 cm de diamètre) à bords tranchants. Dans le cas du riz **pluvial**, on enfonce ainsi dix cylindres répartis sur 80 cm de Largeur (à cheval sur deux Lignes), par niveau de profondeur de 10 cm, jusqu'à 30 cm (figure n° 1). Les carottes sont recueillies et regroupées par profondeur dans un sac. L'extraction des racines se fait par lavage sous tamis à mailles de 1 mm.

Pour chacune des méthodes, le déterrage des racines se fait le plus rapidement possible (moins de 24 heures) après le prélèvement.

4.2.3. ■ Prélèvements par monolithes

Afin de pouvoir étudier l'ensemble du système racinaire de la plante, nous avons d'abord été amené à mettre au point une méthode qui permet d'extraire sur place les racines, en les maintenant dans une position proche de celle qu'elles avaient dans le sol. Cette technique a été utilisée lors des premières études sur le sorgho.

Pour cette plante, on isole un monolithe de 1 x 1 m de surface au sol et de 1,5 m de profondeur, contenant un pied de sorgho. Le monolithe dégagé est entouré d'une cage métallique (photo n° 1). A travers les parois grillagées, on enfonce des tiges d'acier qui transpercent le monolithe de part en part ; elles sont destinées à maintenir en place le système racinaire. Ensuite, on enlève la terre avec un jet d'eau de faible puissance pour faire apparaître les racines maintenues dans une position proche de celle qu'elles avaient dans le sol, ce qui permet de faire différentes observations (photo n° 2). La technique est longue et délicate, mais elle est quand même facilitée lorsque la texture du sol est sableuse comme c'est le cas au Sénégal. Il faut compter une journée entière de **travail** avec trois manœuvres pour obtenir un échantillon.

Le système racinaire conservé dans son entier est amené au laboratoire pour sa caractérisation. On perd les racines situées hors de la surface de prélèvement, mais la plante étant semée à 1 x 1 m, cela est compensé, en

grande partie, par les racines des plantes envahissantes dont beaucoup restent imbriquées dans le chevelu racinaire du pied prélevé. La comparaison des deux techniques de prélèvements globaux par horizons et par méthode de la cage n'a pas montré d'écarts sensibles (CHOPART, 1970).

L'étude de l'enracinement du riz pluvial a été menée suivant le même principe, mais la méthode a été modifiée pour tenir compte de la taille beaucoup plus réduite de la plante et de sa densité de semis.

On isole un monolithe cylindrique de 33 cm de diamètre et de 60 cm de profondeur contenant un pied de riz, et on recouvre ce monolithe d'un panier métallique de diamètre légèrement supérieur (photo n° 3). Après découpage de la base du cylindre, on retourne le panier ; le bloc de sol est ainsi porté au laboratoire, où il est mis à tremper dans de l'eau salée pendant quelques heures, pour disperser l'argile et faciliter le dégagement du système racinaire.

Ces deux techniques de prélèvements, utilisées pour l'étude de l'enracinement du sorgho et du riz pluvial, présentent l'avantage de permettre des observations sur la morphologie du système racinaire. Elles sont par contre délicates à mettre en oeuvre. La technique utilisée sur sorgho (cage) nécessite d'avoir de l'eau sous pression sur le terrain d'expérimentation, ce qui, très souvent, n'est pas le cas. D'autre part, il est pratiquement impossible de déterminer la répartition du système racinaire dans le profil de sol. C'est pourquoi, dès les premiers travaux sur sorgho, nous avons utilisé parallèlement une autre technique de prélèvements de monolithes, dérivée de celle décrite par LEE (1927) et adaptée aux cultures étudiées.

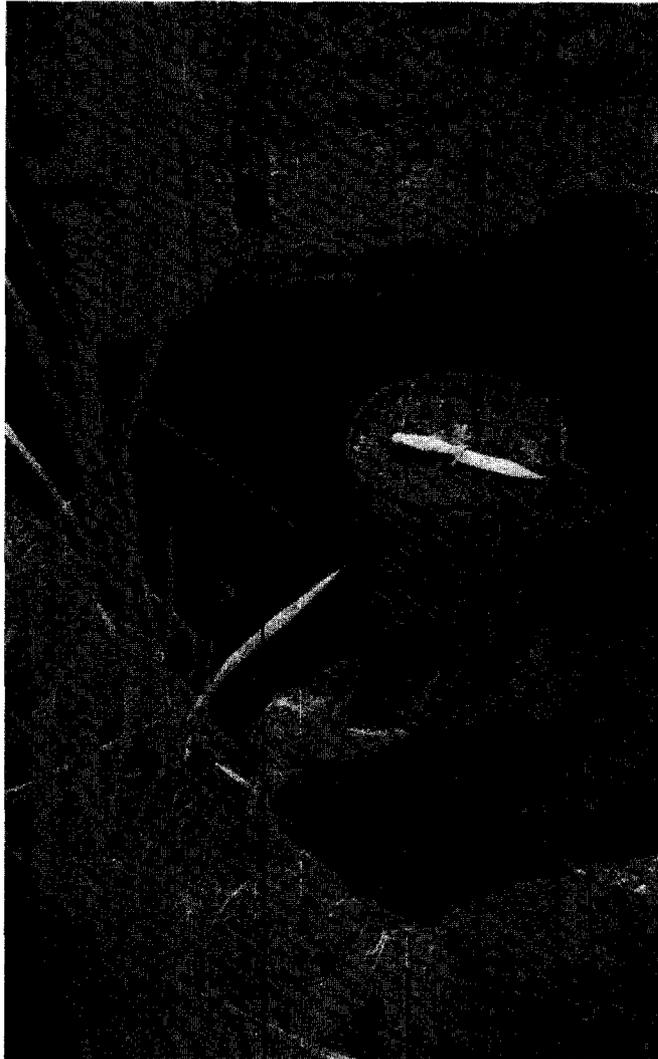
Par la suite, pour les études sur le mil et l'arachide, nous avons uniquement utilisé cette dernière technique, que nous avons appelée prélèvements globaux par horizons ou par tranches de sol.

Méthode de prélèvements globaux par horizons (sorgho, arachide, mil)

Pour le mil et le sorgho, on isole, en creusant une tranchée, un monolithe parallépipédique de sol de 1 m² de surface de base contenant en son centre le pied de mil ou de sorgho (photo n° 6) ; puis on découpe le monolithe en tranches de 10 cm jusqu'au front racinaire. Chaque prélèvement de 0,1 m³ de sol est porté au laboratoire pour extraction par lavage sur tamis, à mailles carrées de 1 mm.

PHOTO n° 3 : TECHNIQUE DE PRELEVEMENT PAR MONOLITHES SUR RIZ PLUVIAL

Monolithe dégagé, recouvert du "panier", prêt à être retourné et transporté au Laboratoire



PHOTOS n° 1 et 2 : TECHNIQUE DE PRELEVEMENT PAR MONOLITHES SUR SORGHO

PHOTO n° 1 : Cage de prélèvement et dégagement du système racinaire du sorgho



PHOTO n° 2 : Système racinaire de sorgho (63-18) dégagé et maintenu par les tiges métalliques

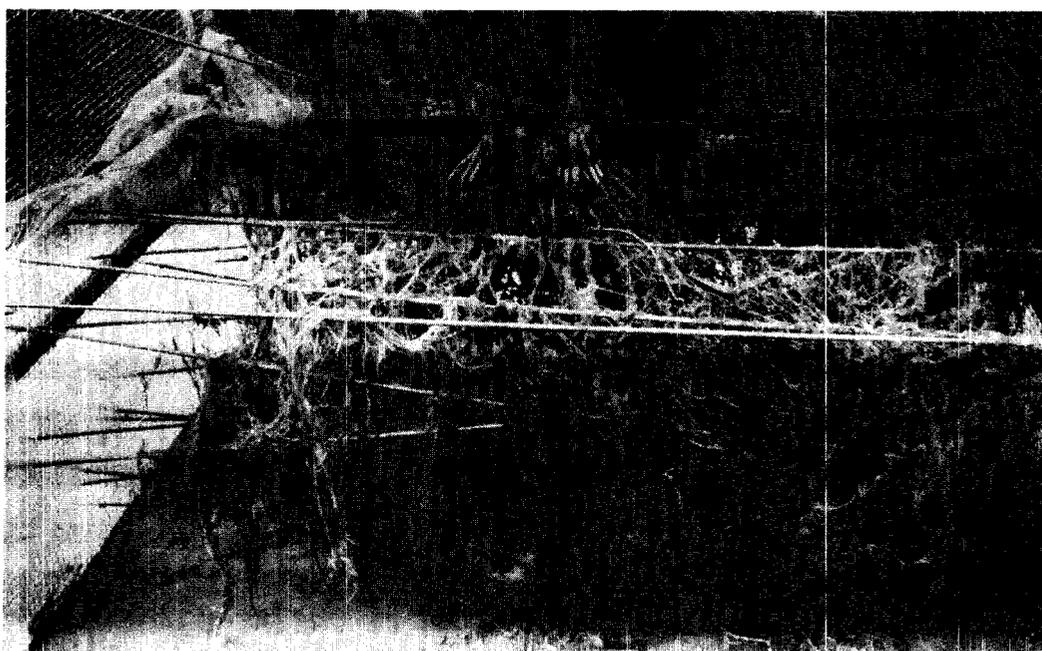
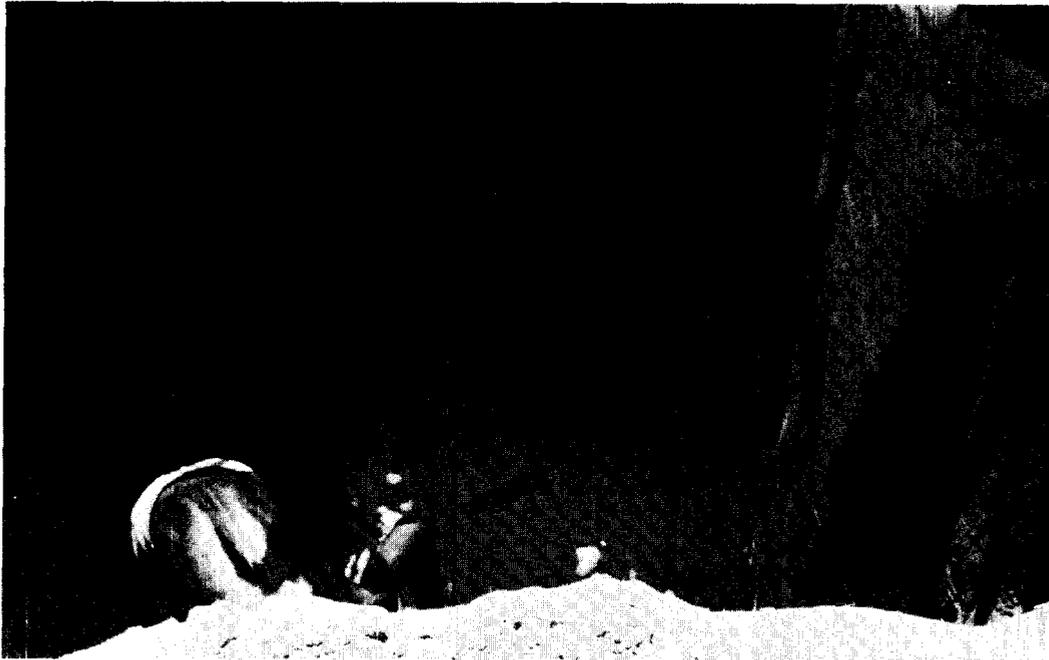


PHOTO n° 6 : TECHNIQUE DE PRELEVEMENT PAR HORIZONS SUR ML

(découpage du sol en tranches de 0,1 m sur une surface de 1 x 1 m)

Prélèvement au **niveau** du front racinaire



PHOTOS n° 4 et 5 : TECHNIQUE DE PRELEVEMENT PAR HORIZONS SUR ARACHIDE

(découpage de sol en tranches de 0,1 m sur une surface
de 0,45 x 0,6 m)

PHOTO n° 4 : Délimitation des niveaux de profondeur

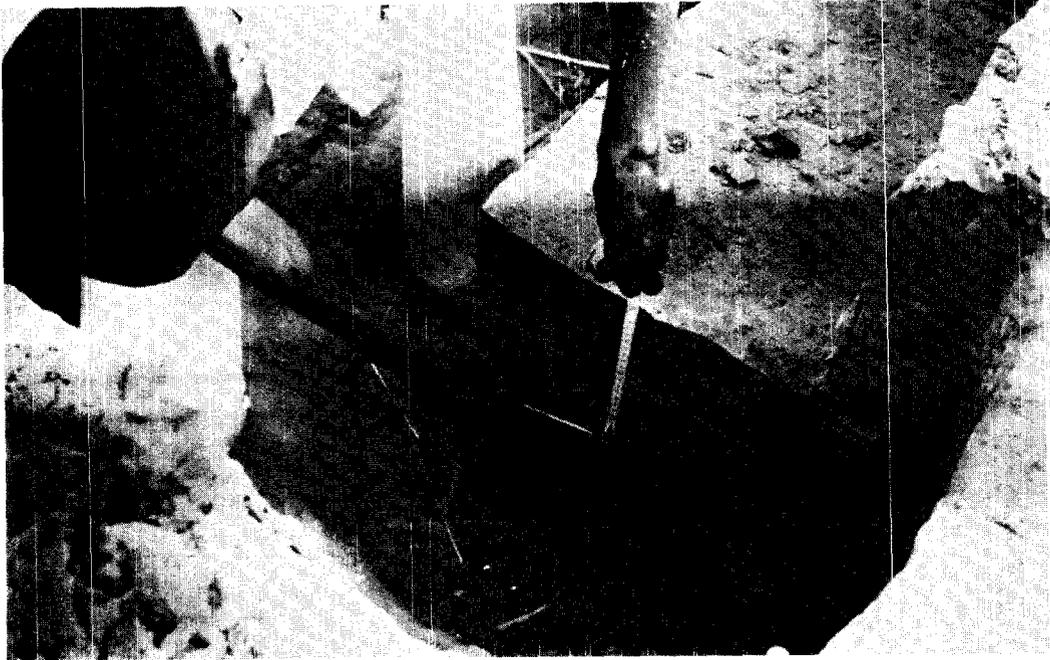


PHOTO n° 5 : Prélèvement de la terre



Pour l'arachide, la méthode est la même, mais la surface de base du monolithe est plus réduite ; elle contient une ligne d'arachide longue de 0,6 m. Cette surface est de 0,6 x 0,45 m dans le cas des arachides hâtives (73-30 et 55-437) semées à 0,45 m d'écartement entre lignes, et de 0,6 x 0,6 m dans le cas de l'arachide semi-hâtive (57-422) dont la distance entre lignes est de 0,6 m (photos n° 4 et 5). Ces dimensions permettent d'extrapoler Les résultats à la production totale des parties aériennes et des racines par m². Sur quelques prélèvements, nous avons divisé chaque niveau de profondeur en bandes de 6,4 cm pour l'arachide et en 25 carrés de 4 dm² pour le mil, ce qui a permis de mesurer la variation d'occupation du sol par les racines en fonction de la distance par rapport au pied.

On peut adapter L'épaisseur des tranches de sol prélevées, d'après Le profil pédologique. Mais, au Sénégal, le sol est généralement homogène et uniformément sableux ou sablo-argileux dans La zone de développement des racines. Aussi avons-nous préféré prélever systématiquement par tranches de 10 cm pour faciliter l'exploitation des résultats.

4.3. - Techniques de caractérisation de L'enracinement

Une fois prélevé, l'échantillon doit être mesuré grâce à des méthodes qui permettent de le caractériser avec Le plus de précision possible. Le choix des paramètres dépend de l'objet de L'étude.

Nous avons essayé de caractériser le plus complètement possible la croissance et: la morphologie des systèmes racinaires de l'arachide, du mi 1, du sorgho et du riz pluvial à plusieurs stades de végétation.

Le poids de matière sèche totale des racines, la profondeur maximale de l'enracinement, la répartition des racines dans le profil et le rapport entre le poids sec des parties aériennes et le poids sec total des racines ont été mesurés sur chacune des cultures. Le nombre total des racines primaires par pied et par talle a été mesuré sur le riz pluvial et le sorgho. Sur le mil, ce paramètre n'a été déterminé qu'à la récolte.

La caractérisation de certains autres paramètres n'a pu se faire qu'après La mise au point des techniques de mesure ou l'acquisition du matériel nécessaire.

C'est le cas de la longueur totale des racines et de la distance moyenne entre les racines dans le sol (à partir de 1977), de la mesure du diamètre moyen des racines d'un échantillon et de l'écart type de la population des diamètres (à partir de 1979). Ces quatre derniers paramètres n'ont pu être mesurés que sur l'enracinement du mil et de l'arachide.

Certains paramètres sont faciles à caractériser : nombre total des racines qui partent du plateau de tallage, poids sec, profondeur maximale, rapport entre le poids des parties aériennes et des racines. D'autres le sont moins, : mesure de la Longueur totale des racines et des distances entre racines, diamètre moyen des racines, dispersion des diamètres autour de la moyenne.

4.3.1. - Nombre total de racines primaires

On fait le comptage de toutes les racines qui partent du plateau de tallage.

4.3.2. - Poids sec - profils de répartition de la masse racinaire dans le sol

Le poids de matière sèche des racines prélevées est mesuré par pesée à 1 mg aussitôt après refroidissement, après un passage de 24 heures dans une étuve à 60°. La pesée du poids sec des racines aux différentes profondeurs permet d'obtenir la répartition des racines dans le profil.

4.3.3. - Profondeur maximale de l'enracinement

Avec la technique de prélèvements par horizons, on retient comme valeur la dernière tranche dans laquelle on trouve des racines ; dans le cas des prélèvements globaux par monolithes, c'est la valeur de la plus longue racine mesurée.

4.3.4. - Rapport poids parties aériennes/racines

On pèse les parties aériennes des pieds prélevés après séchage à l'étuve (105°) pendant 24 heures.

4.3.5. - Longueur totale d'un échantillon de racines

La longueur totale des systèmes racinaires est en général très grande, et sauf, en tout début de cycle, il n'est pas question de la mesurer directement. C'est pourtant, on l'a vu, un paramètre très important, car c'est lui qui permet de caractériser le degré de colonisation du sol par les racines. Plusieurs auteurs en ont souligné l'importance (COWAN, 1965 ; BARLEY, 1970, MAERTENS, 1970).

Une méthode de mesure indirecte de la longueur a été proposée par NEWMAN (1965), basée sur l'utilisation des probabilités géométriques.

Soit une surface S sur laquelle on a étalé des racines. Si l'on dépose au hasard des segments de droite dont la longueur totale est H, l'auteur montre que le nombre d'intersections N des segments de droite et des racines est d'autant plus grand que la longueur des racines L est plus grande, selon la relation :

$$L = \frac{\pi N S}{2 H}$$

La technique de mesure préconisée par l'auteur est la suivante :

- L'étalement se fait dans un récipient plat à l'intérieur d'un rectangle de 10 x 20 cm qui matérialise la surface de mesure,

- on observe les racines au binoculaire muni d'un micromètre oculaire (longueur totale de 1,88 cm) qui sert de segment pour les comptages des intersections ,

- Les mesures des intersections entre le micromètre et les racines peuvent se faire par randomisation complète de la position du segment dans la surface de mesure, ou par randomisation partielle à partir de points fixes régulièrement répartis sur la surface d'étalement des racines.

Le nombre de déplacements du micromètre peut varier entre 20 et 40 suivant le temps disponible et la précision recherchée.

L'auteur trouve ainsi des résultats satisfaisants qui se rapprochent sensiblement des longueurs obtenues par mesure directe.

Tableau n° 5 : Longueur des racines de pois en cm et erreur standard
(NEWMAN, 1965)

Mesure directe	Méthode NEWMAN randomisation partielle	Méthode NEWMAN randomisation totale
731	805 \pm 18 *	757 \pm 18

* différence significative par rapport à la mesure directe.

Ces résultats sont la moyenne de 5 mesures successives avec 40 déplacements du micromètre pour chaque mesure.

Les temps de mesure cités par l'auteur sont nettement diminués par rapport à la méthode directe mais restent encore fort longs, environ 30 minutes par mesure, soit plus de quatre heures pour obtenir chaque moyenne citée.

Des tests sur modèles de racines (fils à coudre) (CHOPART, 1977) ont permis de vérifier que la méthode décrite est très longue. D'autre part, en utilisant la méthode de Ca randomisation absolue, on a obtenu des résultats nettement surestimés.

La surestimation systématique semble provenir d'un étalement des fils imparfait (peu de fils près des bords de la surface de mesure) et d'une randomisation des positions du segment elle aussi imparfaite (positionnements plus fréquents au centre de la surface où les fils sont plus nombreux), ceci malgré les soins apportés. La surface de mesure théorique est alors plus grande que la surface de mesure réellement utilisée ; Le nombre des interactions et la longueur sont donc surestimés.

Un étalement parfait des racines doit améliorer la précision de la mesure par cette méthode, mais ceci semble difficile à réaliser dans les conditions de manipulation courantes.

L'emploi de la méthode des intersections par randomisation partielle devrait à cet égard réduire les risques d'erreurs, tout en augmentant le temps de mesure. Cette dernière technique a d'ailleurs été utilisée par BUI HUIJ TRI et MONNIER (1973).

Adaptation de la méthode des intersections

La formule mathématique utilisée dans La méthode mise au point par NEWMAN n'est valable sensu stricto que pour une répartition au hasard d'un grand nombre de positions du bâtonnet, avec une bonne répartition sur L'ensemble de La surface d'étalement des racines et un grand nombre de répétitions.

La technique proposée par L'auteur nécessite alors un temps de mesure très Long pour obtenir une précision satisfaisante, car il faut déplacer L'échantillon un grand nombre de fois et noter, à chacun de ces déplacements, Le nombre d'intersections entre Les racines et Le micromètre du binoculaire.

Tout en utilisant La même formule mathématique, nous avons essayé de modifier La méthode afin de La rendre plus conciliable avec Les contraintes de travail sur de nombreux échantillons, comme c'est Le cas général dans Les études agronomiques.

Nous avons ainsi mis au point une technique qui, au Lieu d'un grand nombre de fois au hasard, mesure La quasi totalité de La surface d'étalement de L'échantillon,, ce qui justifie parfaitement L'utilisation de La formule de probabilités géométriques mise au point par NEWMAN.

Pour cela, nous avons fait des 'mesures à partir d'une disposition systématique des Lignes d'intersection sur la surface d'étalement afin :

- ~ d'assurer une meilleure répartition des points de comptage sur l'échantillon,
- ~ d'améliorer la rapidité et la facilité de la mesure.

Principe

On étale Les racines sur une surface plane de dimension connue (S). Cette surface est quadrillée de lignes parallèles et équidistantes, horizontalement et verticalement (figure n° 2). IL convient que l'étalement soit fait tout à fait au hasard.

Chacune des Lignes de ce quadrillage fin est assimilée au bâtonnet lancé au hasard dans La méthode de NIEWMAN, et sert au comptage du nombre de points où les racines coupent La ligne. La mesure ne se fait plus sous binoculaire, mais à L'aide d'une Loupe. La surface d'étalement et l'équidistance

entre les lignes peuvent être adaptées à La dimension de l'échantillon, mais les comptages des intersections se font sur L'ensemble des Lignes, dans les deux sens perpendiculai res.

Cette technique présente l'avantage :

- de permettre une répartition homogène des points de comptage sans privi légier aucune partie de la surface ; 1 étalement parfaitement régulier des racines n'est plus alors aussi indispensable,

- d'augmenter notablement la vitesse d'exécution des comptages, car il n'y a plus aucune modification de la position du bâtonnet ; seul, l'oei l bouge,

- de ne plus avoir à travailler sous binoculaire dont' l'utilisa- tion continue est: pénible.

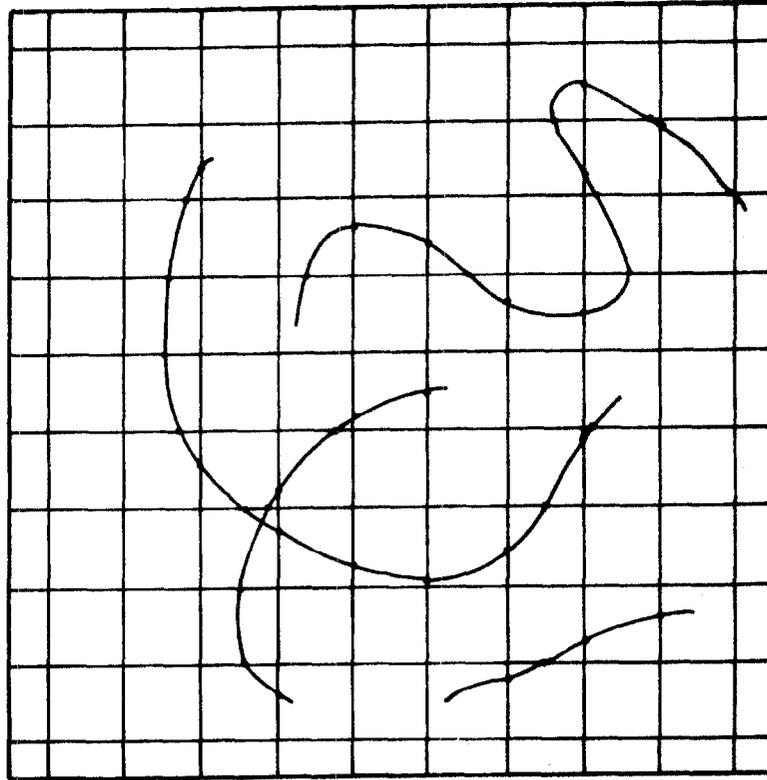
Boîte_ à lumière

Afin de faciliter la mesure, il est préférable de poser La plaque quadrillée sur un appareil qui émet une lumière diffuse. Ce contraste entre Les racines colorées au bleu de méthylène et le fond lumineux est alors très bon et permet de voir à la loupe des racines de quelques centièmes de milli- mètre. Cette source lumineuse doit donner une Lumière diffuse, de faible puis- sance, et surtout ne doit pas produire de chaleur qui risquerait de gêner les mesur es, par séchage des racines et modification de Leur position.

Mode_ opératoire

, Etalement des racines

Après avoir été col.orées au bleu de méthylène, les racines sont soigneusement disposées sur la plaque quadri llée préalablement recouverte d'une fine lame d'eau qui facilite l'étalement. L'eau est ensuite évacuée avec pré- caution, par aspiration lente à l'aide d'une trompe à eau ou plus simplement en inclinant Légèrement la plaque.



Mesure de la longueur de racines

$$S = 100 \text{ cm}^2; N = 41 \text{ cm}; l = 10 \text{ cm}; n = 20 \text{ cm}$$

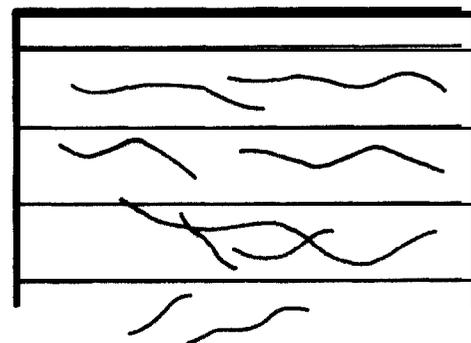
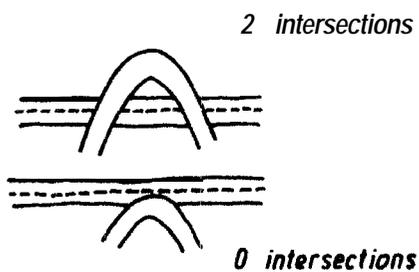
Comptage horizontal : 19 intersections

Comptage vertical : 22 intersections

$$L = \frac{3,14 \times 100 \times 41}{2 \times 20 \times 10}$$

Détail d'intersections

Orientation préférentielle des racines



**FIG. N° 2 : METHODE DE MESURE DE LA LONGUEUR TOTALE
DES RACINES**

, *Comptage des intersections (figure n° 2)*

En s'aidant d'une loupe de grossissement moyen, on compte le nombre d'intersections entre les racines et chacune des lignes parallèles du quadrillage. On note le nombre d'intersections obtenu à la fin de chaque ligne. Les mesures sont faites dans le sens horizontal, puis dans le sens vertical.

Les traits du quadrillage, comme les racines, ont une certaine épaisseur. Ceci est la source de difficultés de comptage lorsque la racine longe la ligne du quadrillage ou que celle-ci est en position tangentielle par rapport à la racine de forme courbe. On est alors obligé d'estimer, avec un risque d'erreur, si le centre de la racine coupe ou non le centre de la ligne (figure n° 2).

Comme nous l'avons signalé, il est nécessaire de mesurer la longueur dans les deux directions perpendiculaires de la surface. En effet, des essais préliminaires ont montré que, si l'on se contente d'une seule direction, les résultats pouvaient être aberrants dans le cas où les racines sont malencontreusement étalées avec une direction préférentielle (figure n° 2).

Pour avoir la longueur, on fait :

$$L = \frac{\pi S N}{2 l n}$$

où S : surface d'étalement

l : longueur de la ligne

n : nombre de lignes

N : nombre total d'intersections.

Dans la plupart des essais qui seront décrits, on aura :

$$S = 100 \text{ cm}^2$$

$$l = 10 \text{ cm}$$

$$n = 40$$

soit une longueur totale de Lignes de comptage de 400 cm.

Lorsque la longueur des racines est très grande, on est obligé de procéder à un échantillonnage. Pour cela, on coupe les racines en petits morceaux que l'on étale avec soin, puis on prélève au hasard de 50 à 100 mg de poids sec, ce qui représente 3 à 10 mètres, de racines. La mesure se fait sur cet échantillon et on calcule la longueur totale en fonction du poids sec total des racines.

4.3.6. - Distance moyenne entre les racines

La distance moyenne entre les racines est calculée suivant une formule mise au point par MAERTENS (1974), à partir de la valeur de la longueur totale des racines par unité de volume.

Si l'on connaît la longueur totale des racines (L) présente dans un cube de 1 dm³, on peut, en admettant que les racines sont équidistantes les unes des autres et rectilignes, calculer le nombre de tronçons de racines de 1 dm rencontrés dans ce cube. Les extrémités des racines sont représentées sur deux faces de ce cube. Sur une arête de 1 dm nous trouvons donc n tronçons distants les uns des autres de $\frac{1}{\sqrt{n}}$ en moyenne.

La distance moyenne (D) exprimée en cm est donc :

$$D = \frac{10}{\sqrt{L}} \quad (L \text{ en dm})$$

4.3.7. - Diamètre moyen des racines

Le diamètre moyen d'une racine assimilée à un cylindre si elle est de faible longueur, peut être déduit de sa longueur (L) et de la surface de la coupe diamétrale de celle-ci (Sd). Il est possible de mesurer la surface de la coupe diamétrale (ou surface diamétrale) d'un échantillon de racines avec un planimètre photo-électrique (BONZON, 1964). L'appareil mis au point par cet auteur est précis, mais encombrant et n'est pas commercialisé.

Il existe aussi des appareils électroniques conçus pour la mesure des surfaces et utilisés en agronomie et en physiologie végétale pour la mesure des surfaces foliaires.

Nous avons pu vérifier sur L'un d'entre eux (**LICOR** de Lambda instruments) que La mesure de surfaces filiformes donne aussi de bons résultats, malgré Le faible pouvoir de résolution de l'appareil (1 mm^2), à condition de faire plusieurs mesures successives et de regrouper les racines (**CHOPART**, 1977).

Mode opératoire

Dans La présente étude, nous avons employé un appareil de surface foliaire plus perfectionné, dont Le pouvoir de résolution de $0,1 \text{ mm}^2$ est nettement meilleur (**LICOR 3100** de Lambda Instruments). Le principe de fonctionnement est basé sur La mesure de l'absorption de La Lumière par le passage d'un objet entre une source lumineuse d'intensité constante et une cellule photo-électrique, La mesure est très simple et rapide.

Aussitôt après un ressuyage soigné, Les racines fraîches, colorées au bleu de méthylène et bien turgescentes, sont passées trois fois dans l'appareil. On retient La moyenne des trois valeurs affichées.

On calcule alors facilement Le diamètre moyen de L'échantillon :

$$\bar{d} = \frac{Sd}{L}$$

4.3.8. - Ecart type des diamètres de racines-indice de ramification

IL s'agit d'un nouveau critère de caractérisation de l'enracinement que nous avons mis au point avec MAERTENS (MAERTENS et CHOPART, 1977).

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. La Longueur totale de L'échantillon est très grande et La valeur des différents diamètres, toujours faible par rapport à La longueur (de L'ordre du millimètre ou du dixième de millimètre), est généralement très variable.

Nous avons déjà pu caractériser la Longueur totale des racines et la valeur du diamètre moyen, mais il est aussi intéressant d'évaluer L'étendue de la variation de La population des diamètres.

En effet, dans les systèmes racinaires étudiés, ce sont: les racines primaires (ou le pivot) qui ont le diamètre le plus important, et les valeurs des diamètres diminuent généralement lorsqu'on augmente le numéro d'ordre (racines secondaires, tertiaires, etc..) qui correspond aux ramifications.

La connaissance simultanée de la moyenne et de l'écart type de la population des diamètres, estimateurs classiques de population, peut donc permettre d'évaluer l'indice de dispersion des diamètres et le degré de ramification.

On peut calculer l'écart type des diamètres d'un échantillon de racines, par mesure directe sous binoculaire de chaque individu, ou d'un grand nombre de sections de racines prises au hasard. La mesure est extrêmement longue et pratiquement irréalisable.

Nous avons obtenu la valeur de cet écart type indirectement à partir de trois mesures globales faciles à réaliser : la longueur totale, la surface diamétrale, et le volume d'un échantillon de racines.

Méthode de calcul

Le volume des racines n'est autre que le produit de la somme des carrés des diamètres par $\frac{\pi}{4}$

$$V = \sum \frac{\pi d^2}{4} \quad (1)$$

La somme des carrés des diamètres peut donc s'écrire :

$$\sum d^2 = \frac{4 V}{\pi} \quad (2)$$

La "surface diamétrale" est le produit du diamètre moyen par la Longueur :

$$S_d = L \bar{d} \quad (3)$$

Comme nous l'avons déjà mentionné, le diamètre moyen est donc :

$$\bar{d} = \frac{S_d}{L} \quad (4)$$

La longueur (L) peut être assimilée à un nombre N d'individus ayant comme Longueur L'unité de mesure et de diamètre constant sur cette Longueur.

L'écart quadratique $\sum (x - \bar{x})^2$, base des estimateurs de population les plus utilisés, peut être calculé des termes suivants :

$$Eq = \sum x^2 - N\bar{x}^2 \quad (5)$$

A partir de L'analyse des résultats de nos mesures et en combinant Les équations (2), (3) et (4), on peut donc obtenir L'écart quadratique des diamètres d'une population de racines de la manière suivante :

$$Eq = \sum d^2 - Ld^2 \quad (6)$$

d'où L'on peut tirer La variance : $\frac{Eq}{L}$ et l'écart type : $\sqrt{\frac{Eq}{L}}$

La Longueur totale et La surface diamétrale des racines sont obtenues suivant Les techniques déjà décrites.

Le volume de L'échantillon est évalué, soit directement par picnométrie, soit à partir du poids de matière fraîche des racines à pleine turgescence et de Leur densité.

C'est cette dernière technique qui a été employée, car la densité des racines fraîches et turgescents des plantes herbacées annuelles, varie très peu ($1,07 \pm 0,02$ d'après MAERTENS) ce qui a été vérifié sur Les cultures étudiées.

La mesure du poids des racines à pleine turgescence nécessite certaines précautions, car, chez des racines coupées et prélevées depuis plusieurs heures, la diminution de turgescence est rapide Lorsqu'elles sont exposées à L'air.

Après Les avoir mises à tremper dans L'eau, nous avons procédé à un ressuyage des racines, sur un papier absorbant (papier Joseph), humide sur la partie où l'on pose Les racines, et sec à La périphérie. Nous avons ainsi obtenu La disparition de L'eau retenue à l'extérieur des racines par tension superficielle et interfaciale sans que celles-ci ne perdent Leur turgescence (CHOPART, 1977).

La méthode proposée permet donc une caractérisation de l'enracinement à partir de la moyenne et de l'écart type. De plus, la détermination des lois de distribution des diamètres du végétal étudié permettrait de reconstituer synthétiquement le système racinaire à partir d'un échantillon aliquote (longueur totale des racines de chaque classe de diamètre). On pourrait aussi calculer la répartition spatiale, en tenant compte des distances moyennes séparant les racines de chaque classe de diamètre à différentes profondeurs et distances du pied. Mais cela nécessite des vérifications et mises au point qui restent à réaliser.

Pour cette étude, nous avons utilisé ce critère comme un indice de dispersion des diamètres autour de la moyenne.

4.4" * Précision des mesures

Il est toujours important de connaître la précision des mesures que l'on réalise à l'aide de techniques plus ou moins imparfaites. Cela paraît encore plus vrai dans ce genre d'étude où les caractérisations de certains paramètres morphologiques, en particulier la longueur, le diamètre moyen et l'écart type des diamètres, se font indirectement, à partir de méthodes peu courantes.

Nous avons donc réalisé une étude de la précision des résultats des différents critères de caractérisation de l'enracinement obtenus par les méthodes qui viennent d'être exposées. Nous avons travaillé sur des modèles (fils métalliques et nylon, de différents diamètres) et sur des racines, en faisant des séries de mesures.

Les principales conclusions sont les suivantes :

Mesure de la longueur

On observe une certaine sous-estimation des résultats : 8 % dans le plus mauvais cas, mais généralement limitée, entre 0 et 4 % si les mesures sont faites avec soin. La fiabilité est assez bonne, l'incertitude relative avec une mesure est de ± 2 %.

Mesure du poids frais

L'incertitude relative du résultat à partir d'une mesure de poids frais est de ± 3 % environ. Compte tenu de l'imprécision liée à la mesure de

la densité ($1,07 \pm 2 \%$), on obtient le calcul du volume d'un échantillon avec une incertitude de $\pm 5 \%$ environ.

Mesure de la surface diamétrale et du diamètre moyen

Sur des racines de soja dont le diamètre varie entre 0,05 et 1,5 mm avec une moyenne de 0,3 à 0,5 mm, nous avons procédé à une évaluation de la surface diamétrale par séparation des racines en plusieurs classes de diamètres, puis par mesure du diamètre et de la longueur de chaque classe. Les résultats obtenus avec l'appareil sont légèrement inférieurs à ceux de la mesure directe (de 5 à 6 %) avec une incertitude sur une mesure de $\pm 5 \%$. Ces résultats concernent des échantillons dont la surface est de 10 cm² environ. Au-dessus de cette valeur, la précision est améliorée, tandis qu'en dessous de 2 cm², elle devient très mauvaise.

L'erreur systématique sur le diamètre moyen est en général faible ; l'erreur aléatoire est par contre assez élevée ± 10 à 13 % au maximum pour une mesure sur des échantillons de racines de 3 à 6 mètres ; au-dessus, elle devient plus faible. Pour les très petits échantillons, du fait de l'imprécision de la mesure de la surface diamétrale, les valeurs ne sont pas représentatives.

L'appareil de mesure de surface diamétrale utilisé dans la présente étude a un pouvoir de résolution de 0,1 mm², supérieur à celui utilisé lors de l'étude méthodologique (1 mm²), mais des vérifications ont montré que la précision des résultats n'augmente que faiblement.

C'est pourquoi, dans les résultats présentés, nous avons systématiquement éliminé la mesure du diamètre moyen sur les échantillons de faible dimension obtenus en début de cycle ou en profondeur.

Calcul de l'écart type des diamètres

Lorsque les différentes mesures de base sont faites dans de bonnes conditions, pour des échantillons de longueur supérieure à 6 mètres et dont la variation des diamètres est suffisamment importante, l'incertitude relative maximale sur le calcul de l'écart type est d'environ $\pm 15 \%$ de la moyenne. Pour des échantillons de très petites dimensions, ou lorsque la variation des diamètres tend vers 0, l'imprécision devient très grande. Comme pour le diamètre

moyen, le calcul de l'écart type des diamètres n'a donc été réalisé, dans cette étude, que sur des échantillons de dimensions suffisantes.

4.5. - Traitement des échantillons

Après la séparation des racines et de la terre, les échantillons de racines sont traités selon l'organigramme ci-dessous (figure n° 3).

Nous avons pris comme exemple un échantillon caractérisé par l'ensemble des paramètres décrits.

Sur certains échantillons, toutes les mesures n'ont pu être réalisées, en particulier ceux prélevés avant 1977, date de mise au point des techniques de mesure de longueur.

Moins de 48 heures doivent séparer le moment du prélèvement et celui de la mise à dessiccation, après mesure de la surface diamétrale.

Les racines séchées se conservent bien lorsqu'elles sont mises en sacs plastiques fermés hermétiquement. La mesure de la Longueur totale peut se faire après la période des prélèvements racinaires, quelques semaines ou quelques mois plus tard.

4.6. - Traitement statistique des données

L'étude de l'enracinement du sorgho et du riz pluvial., a fait l'objet de prélèvements avec plusieurs répétitions au même stade., sur le même essai, ce qui permet des comparaisons statistiques entre les traitements., On a utilisé le test de Student. Mais le nombre réduit de répétitions fait que la comparaison est rarement significative,

Par contre, le suivi de la croissance de certains paramètres racinaires au cours du cycle, permet de tester des ajustements à des fonctions mathématiques, des courbes obtenues.

On teste l'ajustement à une série de fonctions et on mesure le degré de Liaison entre les variables qui est associé à chaque modèle (r^2). On retient la fonction dont le r^2 est le plus fort et on teste le r sur les tables de FISCHER et YATES. Nous avons, utilisé pour cela une calculatrice HP 9825,

TRAITEMENT DE L'ECHANTILLON :

PARAMETRES CARACTERISES

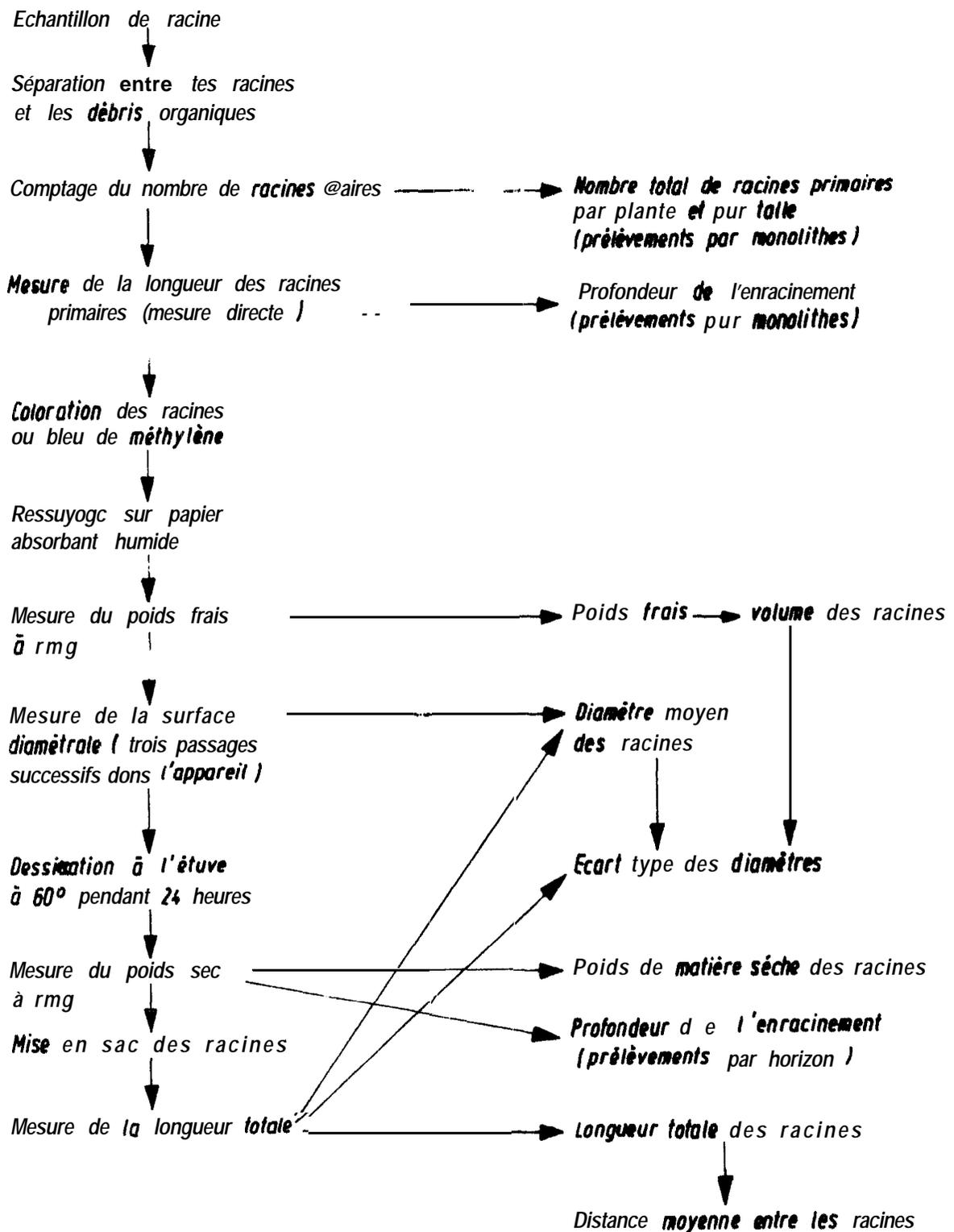


FIG. N° 3: ORGANIGRAMME DES OPERATIONS DE TRAITEMENT D'UNE ECHANTILLON

4.7. " Nombre de prélèvements et de mesures réalisés

La liste de l'ensemble des prélèvements et mesures qui ont été effectués sur les quatre plantes étudiées figure, sous forme synthétique, dans les tableaux annexes n° 1 à 6. Le nombre total de prélèvements globaux (par horizons ou monolithes) réalisés est de :

- arachide :	61
- mil :	67
- sorgho :	59
- riz pluvial :	114

4.8. " Critique des méthodes

Les techniques de prélèvements globaux par monolithes et par horizons, qui sont à l'origine de l'essentiel des résultats, sont très Lourdes. C'est ainsi, que pour l'étude de L'enracinement du mil, environ 100 tonnes de terre ont été tamisées et au total, pour tes quatre espèces, 160 tonnes de terre ont été traitées. Cependant, elles peuvent être considérées comme des méthodes de référence. En effet, elles permettent d'extraire Les racines sur une surface au sot suffisante, supérieure à ta densité de plantation, et donc de faire des extrapolations de production de racines au mètre carré ou à L'hectare, D'autre part, te gros volume de sol prélevé permet d'étudier La quantité de racines en profondeur, lorsque cette-ci est très faibte.

Malgré Le volume des prélèvements, t 'hétérogénéité des résultats, à un même stade de végétation, reste très forte, ce qui est inévitable en conditions nature t Les, compte tenu des multiples causes qui affectent La croissance radi culaire. Les valeurs mesurées devront donc être considérées comme des ordres de grandeur pouvant faire l'objet de variations assez importantes.

Les échantillons de sol+racines obtenus suivant ta technique globale par horizons ayant été passés au tamis à mailles de 1 mm, il se peut que quelques fines racines puissent traverser celui-ci. Toutefois, te prélèvement du sot se fait par volumes de 0,2 à 0,4 dm³, à t'aide d'une bêche bien aiguisée, Les tronçons de racines extraits sont donc relativement importants. Cela ne doit pas avoir d'incidence notable sur les résultats de poids de racines, mais peut diminuer légèrement Leur Longueur totale, surtout en fin de cycle, lorsque tes racines fines deviennent cassantes.

Les mesures de l'enracinement du mil et de l'arachide ont été réalisées à Bambey au cours des années 1971-1979. Cette période est caractérisée par une pluviométrie inférieure à la moyenne, particulièrement les années 1972, 1976, 1977 et 1979. Les résultats n'ont été retenus qu'après avoir vérifié l'absence d'obstacle à la croissance des racines, dû à un horizon de sol desséché. Néanmoins, une humidité du sol souvent faible a pu avoir une certaine incidence sur la croissance racinaire. Les résultats seront donc représentatifs de l'enracinement du mil et de l'arachide dans les conditions climatiques de l'étude ; mais, en cas d'année pluvieuse, ils pourraient sans doute être légèrement supérieurs.

V. * CONCLUSION

L'étude des systèmes racinaires cultivés en pleine terre pose de nombreux problèmes à cause des difficultés d'accès aux racines. IL existe de nombreuses méthodes qui ont, chacune, leurs qualités et leurs défauts ; de même, il existe différents critères pour caractériser Les racines.

Nous avons choisi d'utiliser surtout des techniques de prélèvements de gros volumes de terre contenant l'ensemble de l'enracinement de un ou plusieurs pieds de la plante à étudier.

Cela permet de déterminer la production de racines par plante ou par surface cultivée et d'étudier avec plus de précision la colonisation du sol dans les horizons de profondeur où il n'y a que très peu de racines. Ces techniques sont très lourdes ; elles demandent beaucoup de temps et de main d'oeuvre ce qui empêche de faire de nombreuses répétitions à une même date.

Nous avons essayé de caractériser les paramètres morphologiques des systèmes racinaires qui nous ont paru les plus utiles en agronomie, en utilisant, ou en mettant au point des techniques de mesures aussi simples et rapides que possible, tout en restant suffisamment précises.

Ces différentes techniques ont permis d'obtenir Les résultats qui vont suivre.

TROISIEME PARTIE

RESULTATS

I - INTRODUCTION

Nous avons caractérisé l'enracinement des plantes à plusieurs stades de végétation grâce à la mesure de différentes caractéristiques morphologiques et de croissance.

Cependant, du fait de la mise au point parfois récente des méthodes de mesure, certains critères n'ont pas ou été déterminés sur chacune des quatre espèces. Ainsi, pour les deux premières espèces étudiées, le sorgho et le riz pluvial, seuls des critères plus classiques ont été utilisés : Le poids de matière sèche, Le nombre de racines principales, le front racinaire (profondeur atteinte par le système racinaire à un moment donné de la végétation).

Les appareils souterrains du millet et de l'arachide, dont l'étude est plus récente (Centre 1977 et: 1979) ont pu être caractérisés plus complètement à l'aide des premiers critères déjà utilisés pour le sorgho et le riz, mais aussi par la longueur totale des racines, les distances moyennes entre les racines dans le sol, leur diamètre moyen, et l'écart type de la population des diamètres.

Chacun des critères retenus a une signification et un intérêt agronomique :

- Le poids de matière sèche est le paramètre le plus couramment utilisé dans les études sur les systèmes souterrains ; il permet donc des comparaisons avec les données de la littérature. Son intérêt réside aussi dans l'étude des rapports de masse des parties aériennes et souterraines, ainsi que dans l'évaluation de la restitution dans le sol de la matière organique en provenance des racines après la mort de la plante,

- le nombre de racines principales qui viennent se rattacher aux parties aériennes permet d'évaluer la section totale des voies de passage de la sève dans les tissus vasculaires au niveau du collet,

- le front racinaire permet de déterminer la quantité potentielle d'eau et d'éléments minéraux à la disposition de la plante,

- la longueur totale des racines par plante et par volume de sol, d'où l'on peut tirer les distances moyennes entre les racines, 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 colonisa-

tion du sol par les racines, et d'évaluer les distances maximales que les molécules d'eau et d'éléments nutritifs auront à parcourir pour arriver jusqu'aux racines,

- Le diamètre moyen des racines et L'écart type de la population des diamètres sont des caractéristiques morphologiques intéressantes car ils permettent de juger de la finesse des racines et de leur degré de ramification. D'autre part, à partir des 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).

C'est aussi un critère très important dans les études de nutrition minérale de la plante.

Pour chacune des espèces cultivées, nous avons présenté dans un paragraphe séparé les caractéristiques du système racinaire dans Les tous premiers jours du cycle. En effet, à ce stade, les modifications de la morphologie sont souvent très rapides et elles ont plutôt été appréhendées grâce à des observations directes. D'autre part, la vitesse de croissance au moment de la levée joue un rôle important car, comme nous L'avons signalé, les pluies sont encore très irrégulières au début de la période de culture.

Nous présenterons d'abord les résultats obtenus sur l'arachide, ensuite sur Les céréales : mil, sorgho et riz. Cet ordre ne correspond pas tout à fait à celui dans lequel les espèces ont été étudiées, mais plutôt à une séparation entre Légumineuses et céréales, et à une importance décroissante dans les Superfici:ies cultivées au Sénégal. L'arachide et le mil, Les deux espèces dont le rôle économique est le plus grand, et qui ont fait l'objet d'une caractérisation plus complète seront donc étudiés les premiers.

II. - DEVELOPPEMENT DU SYSTEME RACINAIRE DE L'ARACHIDE AVEC ET SANS TRAVAIL DU SOL

L'arachide est une légumineuse à système racinaire pivotant. La production arachidière est La principale source de revenus monétaires des agriculteurs (75 % de la population) et elle est d'une importance vitale pour le pays. Le semis se fait après La première pluie importante, à la fin du mois de

juin ou au début du mois de juillet. En milieu rural., le paysan doit souvent échelonner son semis sur plusieurs jours, et semer alors dans un sol en début de dessèchement en surface. La vitesse de croissance en profondeur parait donc importante dès le début de cycle.

Le semis est généralement réalisé en ligne à l'aide d'un semoir (45 à 60 cm entre les lignes suivant les variétés), avec une graine tous les 10 à 15 cm. Le nombre de pieds par mètre carré peut donc être légèrement variable suivant les conditions de semis et le pourcentage de levée. Cependant, la plante compense bien ces irrégularités par un développement individuel plus ou moins grand, si les écarts par rapport à la densité théorique ne sont pas trop importants.

C'est pourquoi, nous avons toujours prélevé des monolithes contenant plusieurs pieds et nous avons jugé préférable, pour cette étude au champ, d'exprimer les résultats par surface cultivée (m^2) ou par volume de sol plutôt qu'en production par pied. Pour avoir une estimation des valeurs par pied, il suffit de connaître le nombre de pieds par m^2 qui est de 15 en moyenne pour les variétés hâtives (55-437 et 73-30) et de 11 pour la variété semi-hâtive (57-422). La longueur totale du cycle végétatif est de 95 jours pour les variétés hâtives et de 105 jours pour la variété semi-hâtive.

2.1. - Germination et début de cycle

Après 48 heures de germination en sol humide, la racine séminale apparaît. Elle s'enfonce verticalement et sa vitesse de croissance est rapide. Trois à quatre jours après la levée, soit six à sept jours après le semis, l'extrémité du pivot se trouve déjà à une profondeur de 25-30 cm., ce qui, compte tenu de la profondeur du semis, correspond à une vitesse de croissance de 5 cm/jour environ. A ce moment, le pivot ne compte encore aucune racine secondaire. Celles-ci apparaissent peu après, immédiatement sous la base de l'hypocotyle : quatre racines sont initiées en même temps et sont opposées deux à deux de part et d'autre du pivot. Elles ont une croissance horizontale qui est lente par rapport à celle du pivot. Un deuxième groupe de quatre racines apparaît ensuite sous le premier. Ces racines restent très peu ramifiées au cours de leurs premiers jours de croissance, ce qui fait que, en début de cycle, l'extension du système racinaire se fait surtout vers la profondeur.

Dans de bonnes conditions de germination (pas d'engorgement temporaire ou de formation de croûte), le travail du sol n'a pas d'effet visible sur la germination et la levée de l'arachide.

Par ailleurs, en culture de plein champ, les observations montrent que la qualité des semences, les conditions hydriques et la profondeur de semis ont plus d'importance sur la vitesse de germination des trois variétés étudiées (55-437, 73-30, 57-422) que le potentiel génétique.

La vitesse de croissance du pivot est donc particulièrement rapide dans les premiers jours de végétation, au moins lorsque celui-ci ne rencontre pas d'obstacle à sa croissance, en particulier un horizon de sol asséché.

2.2. - Evolution du front racinaire au cours du cycle de la plante.

A partir du septième jour après le début de la germination, nous avons réalisé des prélèvements qui permettent de suivre l'évolution du front racinaire de l'arachide en fonction du temps ; les résultats sont présentés sur la figure n° 4.

Les trois variétés étudiées ont des vitesses d'avancement comparables. L'évolution de la profondeur du front racinaire s'ajuste bien à une fonction du premier degré entre le septième et le cinquantième jour. Sur les deux traitements, l'évolution de la profondeur de l'enracinement en cm (z) en fonction du nombre de jours après le semis (t) peut être ajustée à une droite :

$$\text{Témoin : } z = 2,04 t + 12 \text{ avec } n = 16 \quad r = 0,962$$

$$\text{Labour : } z = 2,72 t + 9,7 \text{ avec } n = 32 \quad r = 0,972$$

La vitesse d'avancement du front représentée par le coefficient de régression de chaque fonction, est donc constante entre le septième et le cinquantième jour. Elle a sensiblement diminué par rapport aux tous premiers jours du cycle ; ceci est peut-être en relation avec l'apparition de racines sur le pivot. D'autre part, la vitesse d'avancement est plus rapide sur sol labouré, ce qui montre une certaine sensibilité de la croissance du pivot aux conditions physiques du sol dans l'horizon de surface (0-20 cm), même lorsque la zone d'élongation a largement dépassé cette profondeur.

Le cinquantième jour, c'est à dire au moment de la fin de La floraison uti Le et du début: de la formation des gousses, la profondeur atteinte par L'enracinement est de 150 cm environ sur Labour, alors qu'elle n'est que de 115 cm sur le témoin. Entre 50 et 95 jours, la profondeur du front racinaire reste constante sur labour, mais elle continue à augmenter Légèrement sur le témoin pour atteindre à la récolte de 740 à 150 cm environ, comme sur Le traitement labouré.

L'évolution du front racinaire de l'arachide correspond en fait a La vitesse d'élongation du pivot qui reste toujours plus ou moins vertical et rectiligne ; l'arrêt brutal de cette élongation aux environs du cinquantième jour ne correspond pas à un obstacle en provenance du sol ; i l s'agit bier d'une caractéristique d'ordre génétique.

La profondeur maximale de l'enracinement que nous avons trouvée est: assez nettement supérieure à celle mesurée par ORGIAS (1951), au Sénégal, mais sur un sol plus argileux. La vitesse d'avancement du front est par contre tout à fait comparable à celle enregistrée par LEA (1951) sur sol sablo-argi leux de Tanzanie où les valeurs trouvées par cet auteur sont de 2,8 cm/jour pendant tes cinquante premiers jours. Par contre, celui-ci observe encore une certaine évolution plus lente, jusqu'à la récolte, ce qui fait que le système racinaire atteint 170 cm en fin de cycle, 150 jours après le semis. Cela semblerait indiquer qu'il y ait des possibilités d'amélioration de la profondeur maximale de L'enracinement de nos variétés.

2.3. - Evolution du poids total de matière sèche des racines et du rapport. poids, parties aériennes/racines

2.3.1. - Arachide hâtive : variétés 55-437 et 73-30

Les résultats détaillés des mesures effectuées aux différents stades de végétation sur les deux variétés de 95 jours figurent dans les tableaux annexes n° 7 et 8 . Au champ, on n'a pas trouvé de différence notable dans le rythme de croissance de ces deux variétés dont la morphologie est: très comparable ; on a donc regroupé les résultats obtenus sur Les deux variétés.

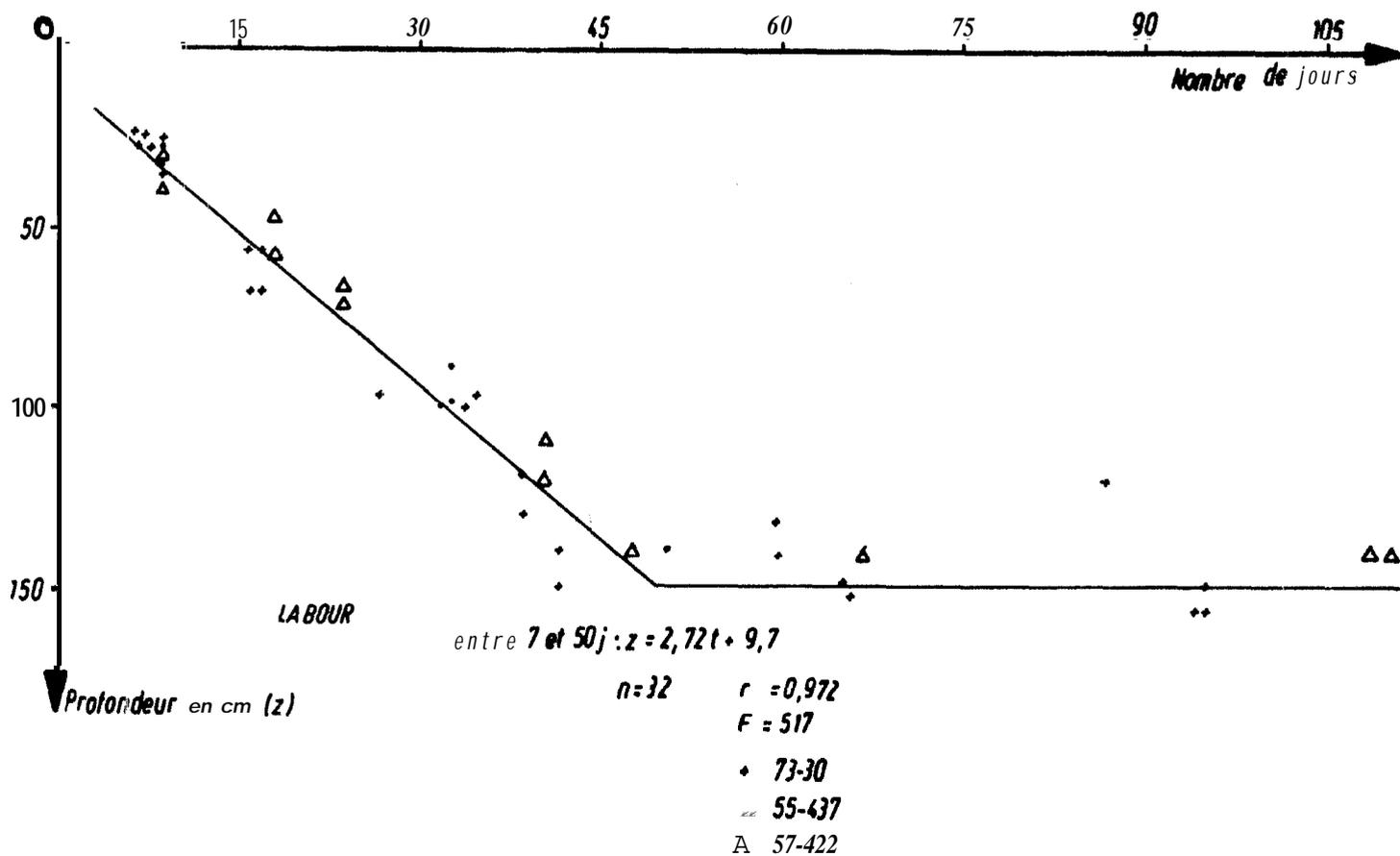
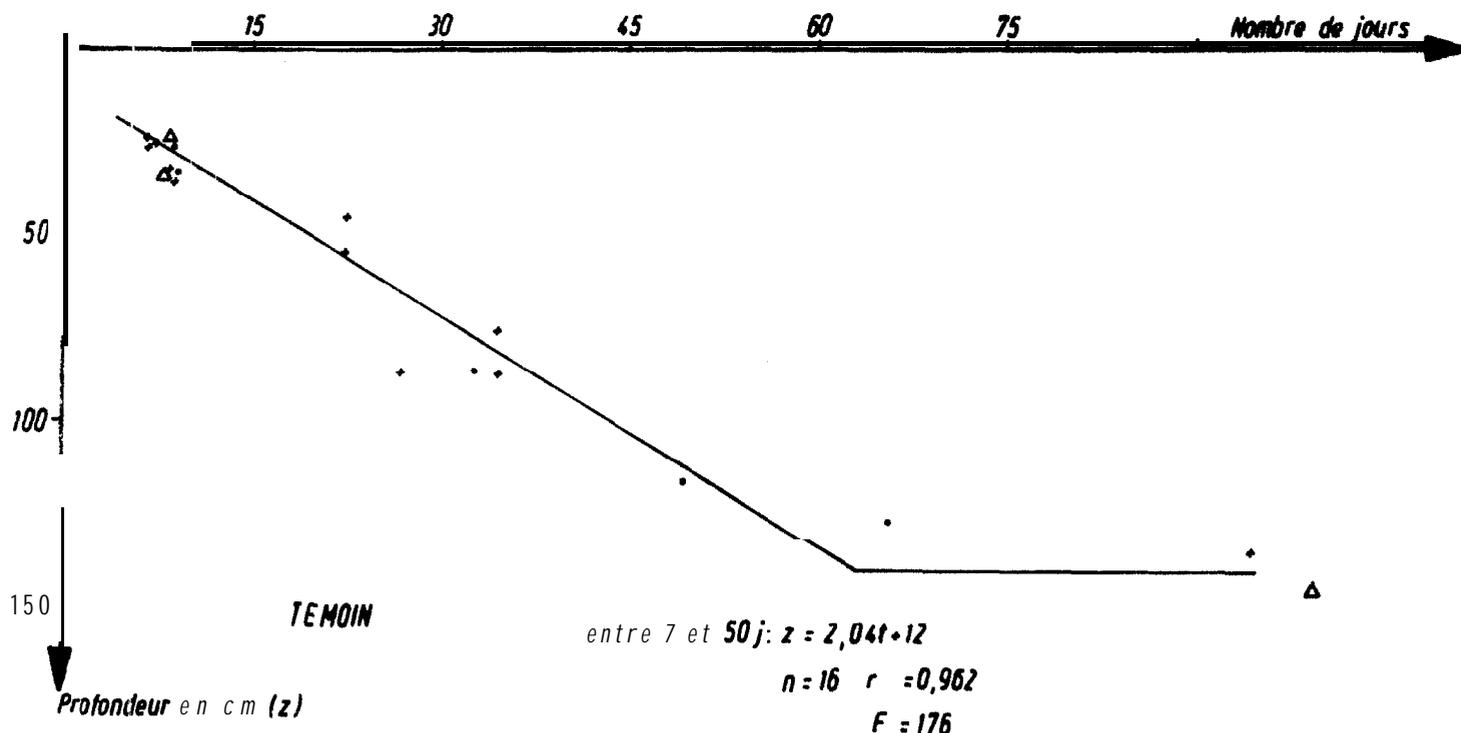


Fig. n° 4 Evolution du front racinaire de l'arachide

Les évolutions du poids sec total des racines et des parties aériennes des pieds prélevés apparaissent sur la figure n° 5. Les résultats sont exprimés en gramme de matière sèche de racines et de parties aériennes par mètre carré de surface cultivée. L'échelle de l'évolution du poids des parties aériennes est différente dans un rapport de 1 à 5 à celle des racines.

La croissance pondérale des racines, comme celle des parties aériennes suit une courbe en S, ce qui paraît assez classique dans les courbes de croissance des végétaux (CHAMPAGNAT, OZENDA et BAILLAUD, 1969).

En début de cycle et jusqu'à 40 jours ou 45 jours sur le témoin, la première partie de cette courbe en S peut être ajustée à une fonction exponentielle, comme cela a été proposé par BLACKMAN (cité par CHAMPAGNAT, OZENDA et BAILLAUD, 1969) ; cet auteur considère que, en cours de prolifération, le nombre de cellules en division est d'autant plus grand que le nombre de cellules présentes est lui-même important. Il estime donc que le rapport de la croissance absolue, à la taille ou au poids initial est constant pour un temps donné, autrement dit que la vitesse de croissance relative est constante. On a donc une formule exponentielle du type :

$$x = x_0 e^{rt}$$

où x_0 est la valeur initiale du paramètre mesuré (poids, taille), t le temps et r la vitesse de croissance relative.

Pour les racines d'arachide hâtive, les résultats obtenus sont les suivants :

P : poids total des racines en grammes de matière sèche par mètre carré de surface cultivée,

t : nombre de jours après le semis

. témoin $P = 0,192e^{0,110t}$

$$n = 13 \quad r^2 = 0,970$$

. labour $P = 0,198e^{0,119t}$

$$n = 23 \quad r^2 = 0,967$$

Les valeurs de la vitesse de croissance relative avec et sans travail du sol sont proches, et la différence entre le poids des racines avec et sans travail du sol est donc faible ; celle-ci paraît un peu plus marquée sur les parties aériennes (figure n° 5). Le travail du sol semble donc avoir un effet plus net sur le poids des parties aériennes que sur le poids des racines. On peut attribuer cette observation au fait que le labour a pour effet d'améliorer la fixation symbiotique de l'azote par l'arachide (WEY et OBATON, 1978).

Le poids sec de racines atteint son maximum vers le cinquantième jour, c'est à dire au moment de la fin de la floraison utile ; il se stabilise ensuite jusqu'à la récolte avec une valeur de 30 à 40 g/m² (y compris les pivots). L'arrêt de l'augmentation du poids de racines correspond donc à l'arrêt de l'évolution du front racinaire en profondeur. Le poids sec total des parties aériennes (sans les gousses) atteint son maximum un peu plus tard entre le soixantième et le soixante dixième jour. Dans les conditions expérimentales de l'étude, le poids des parties aériennes en fin de cycle est de 250 g/m² sur le témoin et de 320 à 370 g/m² sur labour.

Grâce aux mesures de poids sec des racines et de celles des parties aériennes (sans les gousses), on peut calculer le rapport parties aériennes/racines (PA/R) et son évolution au cours du cycle à partir du septième jour après le semis. Les résultats apparaissent sur la figure n° 6. Ce rapport, obtenu à partir de prélèvements réalisés sur une surface de 0,45 x 0,60 m est très variable, surtout en début de cycle. Sur le témoin, il fluctue entre 4 et 8 tout au long du cycle. Avec labour, on observe une légère augmentation pendant la végétation : le rapport PA/R passe d'une valeur comprise entre quatre et neuf en début de cycle, à une valeur comprise entre sept et onze en fin de cycle. L'évolution du rapport PA/R peut s'ajuster à une droite d'équation :

$$PA/R = 0,049 t + 5,36$$

$$n = 32 \quad r = 0,620 \quad (HS)$$

Sur labour, le rapport entre le poids des parties aériennes et celui des racines n'est donc pas constant ; il augmente au cours du cycle, ce qui traduit une vitesse de croissance légèrement plus grande des parties

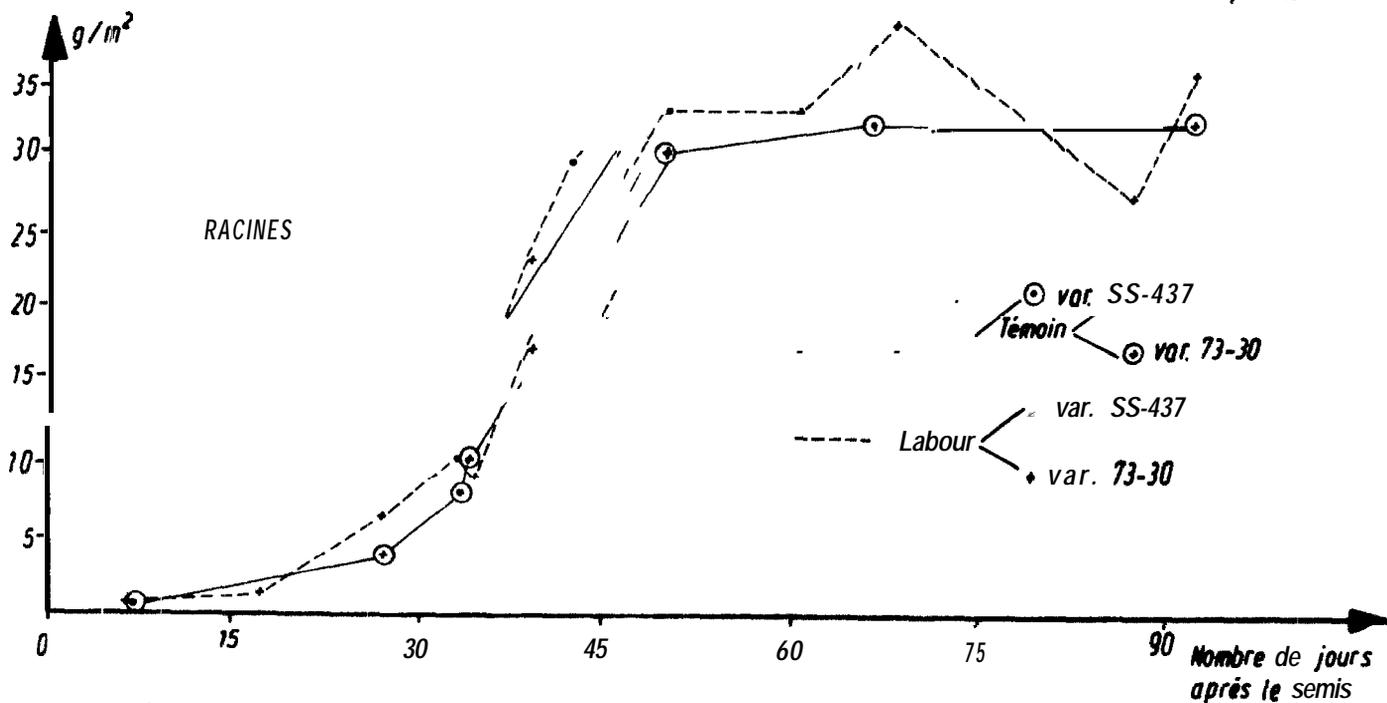
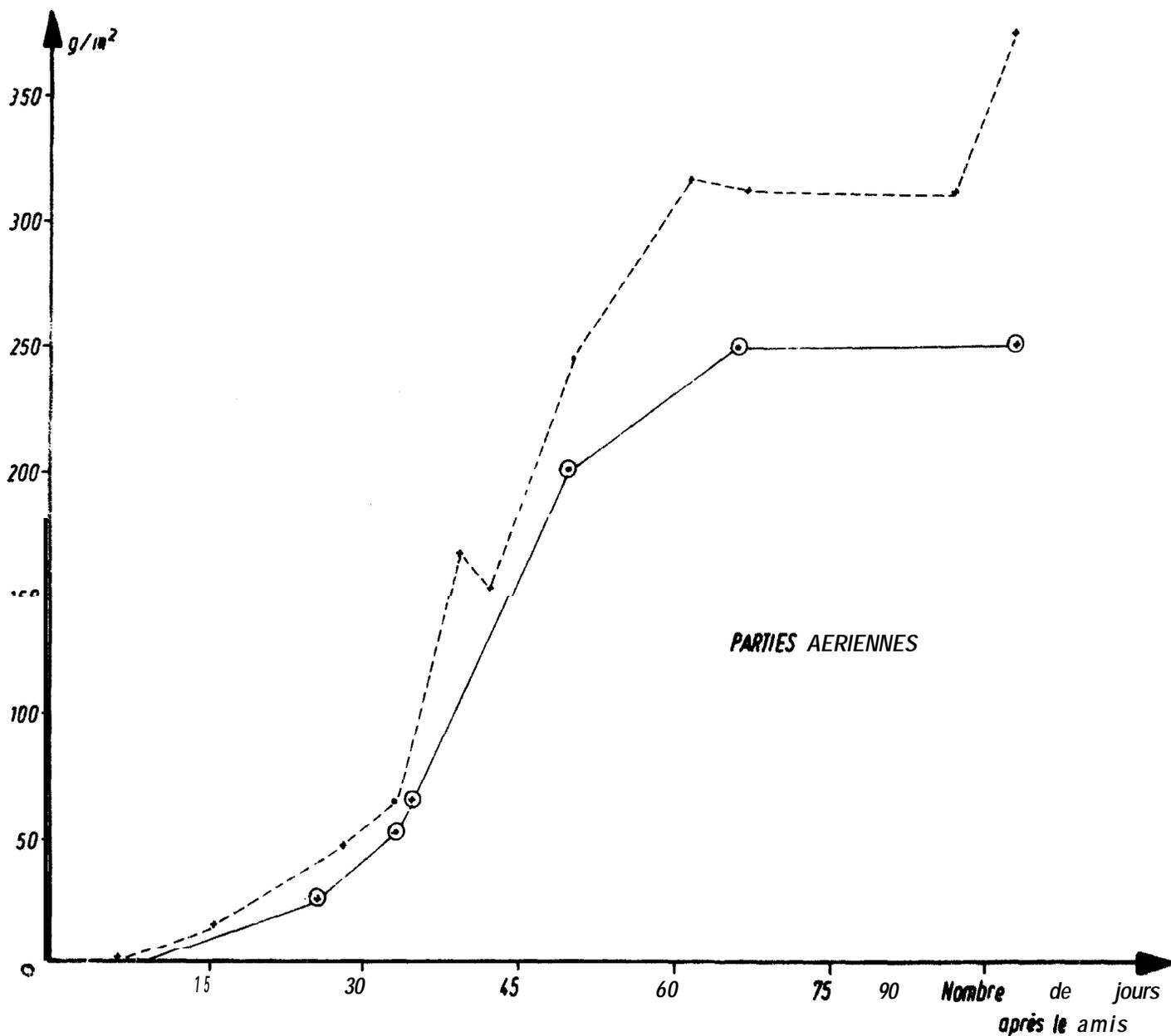
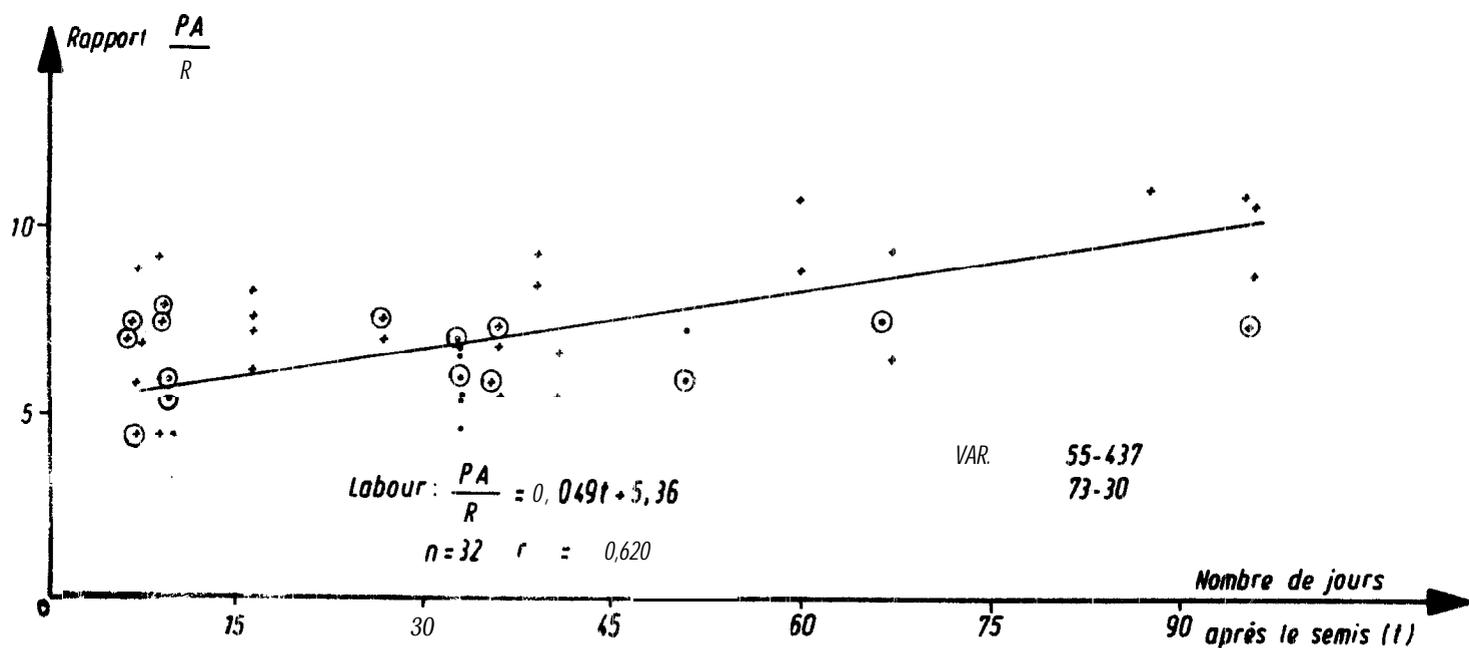
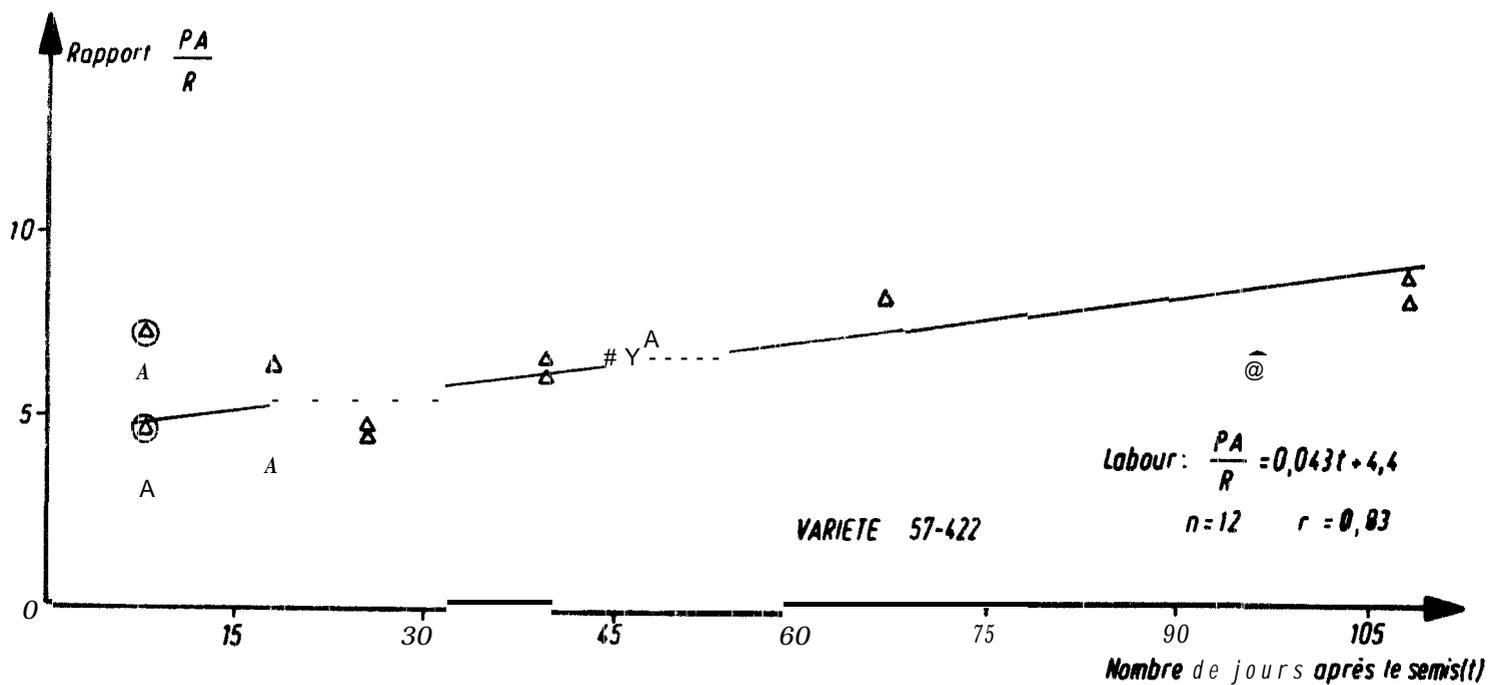


Fig. n° 5 Evolution du poids sec des racines et des parties aériennes d'arachides hâtives 73-30 et 55-437 (en g/m²)



+ 73-33 Labour
 ⊙ Témoin

· SS-437 Labour
 ⊙ SS-437 Témoin

△ 57-422 Labour
 ⊙△ 57-422 Témoin

Fig. n° 6 Evolution du rapport poids sec parties aériennes / racines (sans les gousses)

aériennes par rapport aux racines pendant La première moitié du cycle, puis un arrêt plus précoce de la croissance pondérale des racines.

2.3.2. = Arachide semi-hâtive (57-422)

Les résultats de l'étude de l'évolution des poids secs totaux des racines et des parties aériennes des pieds prélevés sont présentés dans La figure n° 7. Le nombre de prélèvements effectués sur l'arachide semi-hâtive est plus faible que celui des variétés hâtives, surtout sur le témoin ; nous n'avons retenu que les résultats obtenus sur labour.

On remarque que, si L'allure générale de la croissance est une courbe en S comme pour les variétés hâtives, la vitesse de croissance des racines est plus lente, elle paraît se prolonger jusqu'à la récolte pour atteindre à ce stade un poids sec total de 35 g/m^2 , comme celui obtenu sur les variétés 55-437 et 73-30. Le poids des parties aériennes par m^2 à la récolte est légèrement plus faible que celui des variétés hâtives.

Sur labour, le rapport PA/R augmente légèrement au cours du cycle (figure n° 6) ; la variation du rapport PA/R peut, comme pour les variétés hâtives, s'ajuster à une fonction du premier degré :

$$\text{PA/R} = 0,043 t + 4,4$$

$$n = 12 \quad r = 0,83 \text{ (HS)}$$

La valeur de ce rapport en début de cycle est légèrement inférieure à celle obtenue sur les variétés hâtives, de même que le coefficient de régression 0,043 , contre 0,049 pour les variétés hâtives, ce qui fait que, en moyenne, le rapport PA/R de la variété 57-422 est toujours inférieur à celui des variétés hâtives.

Si les courbes d'évolution du poids des racines et des parties aériennes de l'arachide en fonction du temps sont globalement comparables, avec et sans travail du sol et sur Les différentes variétés (courbes en S, avec augmentation de type exponentielle dans la première moitié du cycle), on peut toutefois déceler certains écarts dans Les vitesses de croissance et dans Les dates de l'arrêt de celle-ci, ce qui traduit donc un comportement différent en fonction des techniques ou des variétés.

2.4. - Répartition du poids sec des racines en fonction de la profondeur

Les prélèvements de sol + racines ayant été réalisés par tranches de 10 cm de sol jusqu'au front racinaire, on peut étudier la quantité de racines développées à différentes profondeurs dans le sol (tableaux annexes n° 7 et 8), ce qui permet de tracer un profil racinaire.

Dans le cas de l'arachide, cette répartition verticale de l'enracinement se révèle très irrégulière d'une répétition à l'autre, particulièrement au cours de la première moitié du cycle, lorsque l'enracinement est en pleine phase de croissance. Il est donc très difficile de dégager un profil racinaire moyen. Entre le cinquantième jour de végétation et la récolte, le poids des racines se stabilise et il devient possible d'étudier la répartition verticale des racines. L'hétérogénéité reste cependant importante, plus grande pour les différentes répétitions réalisées à un même stade que les moyennes de dates différentes, c'est pourquoi, nous avons préféré regrouper toutes les données pour cette période afin d'avoir une estimation du profil racinaire moyen de l'arachide lorsque celui-ci atteint son stade de développement maximum.

2.4.1. - Arachide hâtive (variétés 55-437 et 73-30)

Les profils racinaires (figure n° 8) montrent, qu'en surface, la densité racinaire commence par décroître rapidement, puis entre 30 et 120 cm de profondeur la décroissance est plus faible.

Nous avons fait figurer dans les tableaux n° 6 et 7 les valeurs moyennes de densité racinaire dans le sol (en mg/dm³ de sol) et ces effets du labour en surface et en profondeur. En profondeur, le système racinaire est toujours moins développé qu'en surface, mais le degré de colonisation du sol par les racines en profondeur peut jouer un rôle important, surtout pour l'alimentation hydrique. En effet, les réserves hydriques de la surface sont rapidement épuisées entre deux périodes pluvieuses et la plante doit extraire l'eau (et les éléments minéraux) dans les couches plus profondes. C'est pourquoi, pour l'arachide, comme pour les autres espèces, nous accorderons un intérêt particulier à la colonisation par les racines des horizons de profondeur.

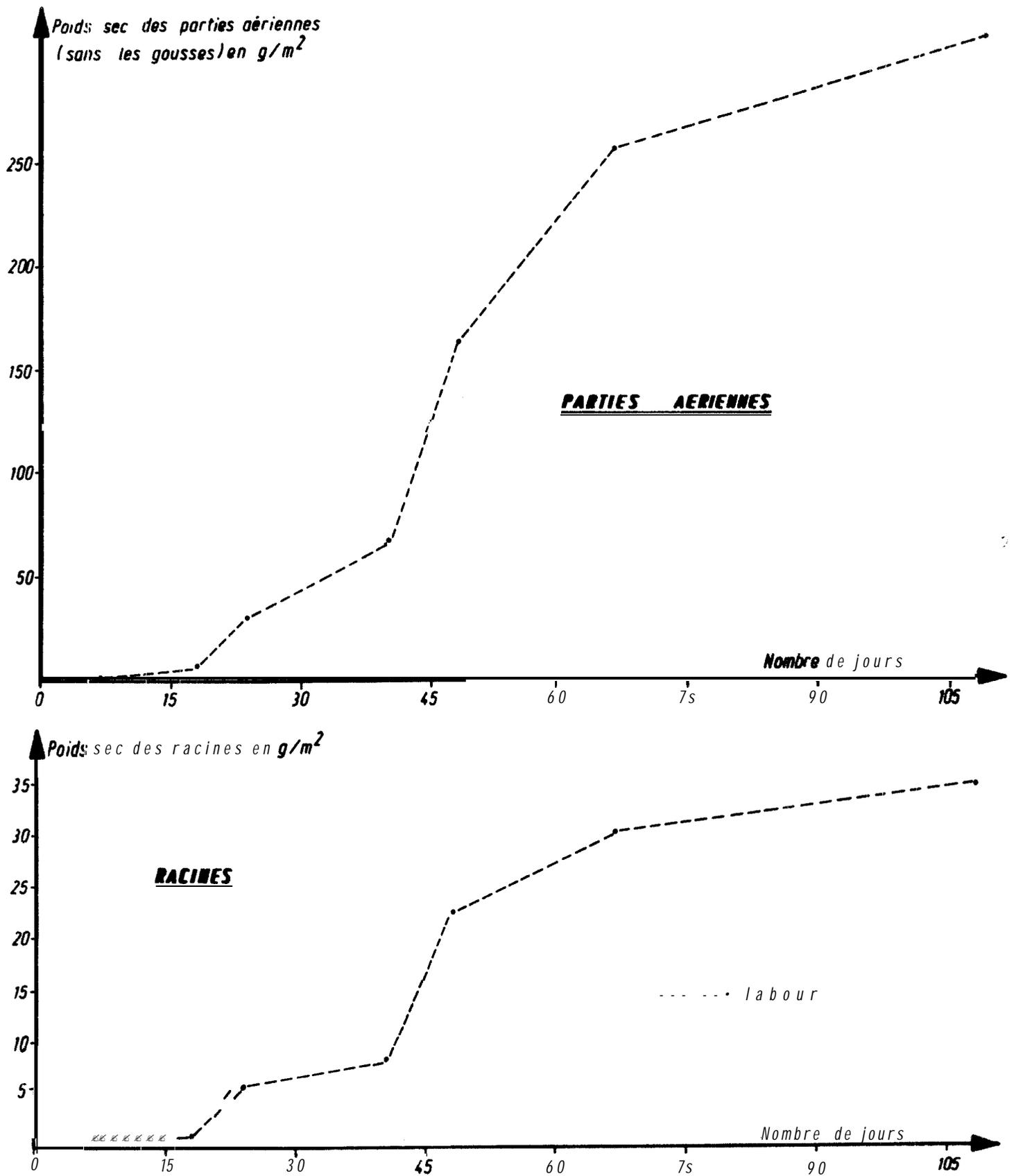


Fig. n° 7 Evolution du poids sec des racines et des parties aériennes de l'arachide demi-hâtive 57422 (en g/m²)

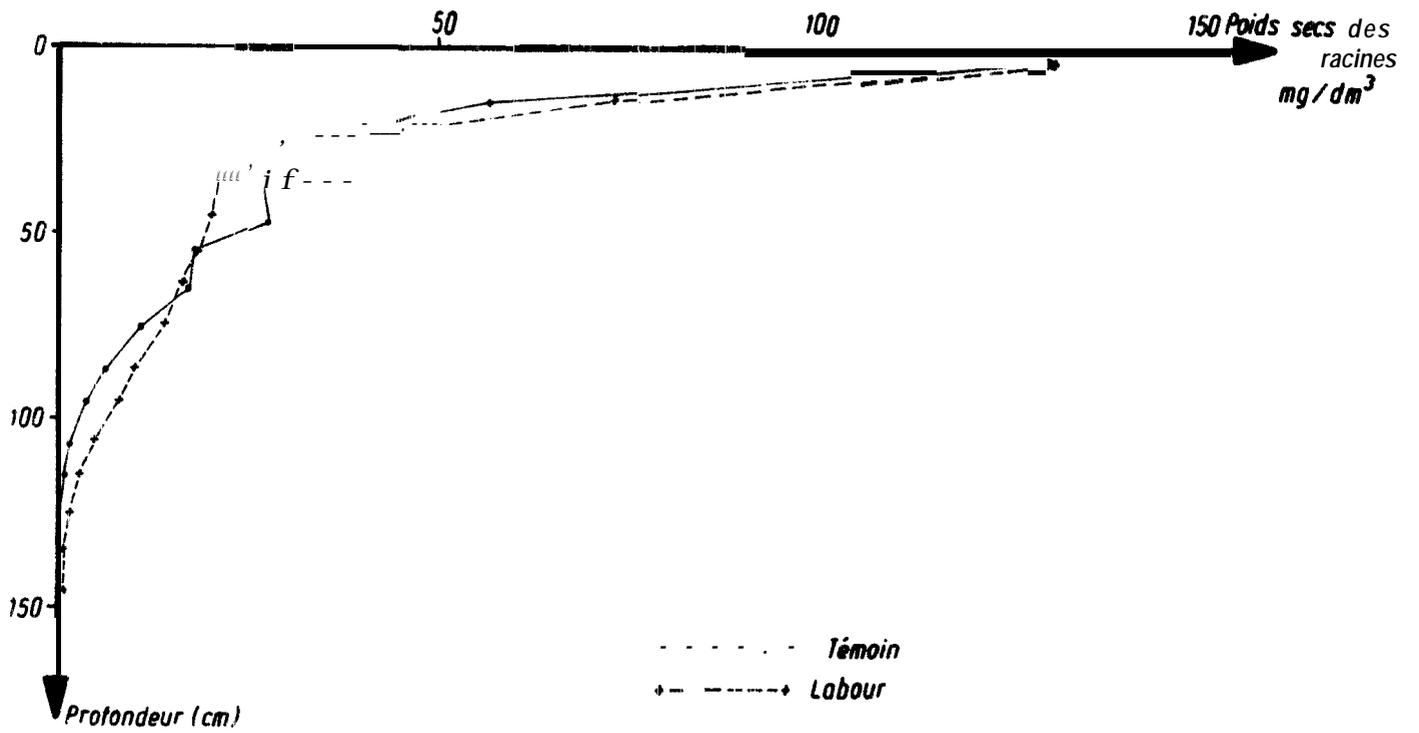


Fig. n° 8 Profils racinaires arachide hâtive 73-30

et 55-437 entre 50 et 90 jours (mg/dm³ de sol)

Tableau n° 6 : Répartition des racines d'arachide dans le profil de sol
densité racinaire en mg de matière sèche par dm³ de sol,
et pourcentage du total de la masse racinaire.

Stade de végétation		34 jours après Le semis (floraison)				entre 50 et 95 jours après le semis (formation et maturation des gousses)			
Traitement		Témoïn		Labour		Témoïn		Labour	
		Densité racinaire	%	Densité racinaire	%	Densité racinaire	%	Densité racinaire	%
Pro- fondeur	0 - 30 cm	24	77,8	25	75,1	73	66,0	79	65
	30- 70 cm	5	21,6	6	24,0	23	27,7	19	21
	70-140 cm	0,3(1)	0,6	0,3(1)	0,9	3	6,3	7	14

(1) Labour : front racinaire à 100 cm : densité moyenne entre 70 et 100 cm

Témoïn : front racinaire à 90 cm : densité moyenne entre 70 et 90 cm

Tableau n° 7 : Effet du labour sur la densité racinaire dans le profil
du sol (% des différences labour - témoïn)

Stade de végétation		34 jours après le semis		entre 50 et 95 jours après le semis	
Profondeur	0-30 cm	+ 4 %		+ 8,2 %	
	30-70 cm	+ 20 %		- 17,4 %	
	70-140cm	+ 50 %		+ 130 %	

Nous avons vu que L'effet du Labour sur la masse totale de l'enra-
cinement est faible. Mais on s'aperçoit toutefois que si dans Les couches super-
ficielles où se trouve la majorité du système racinaire, l'effet du labour n'est
plus sensible dès le trente quatrième jour, il est par contre important en pro-

fondeur. C'est le cas en dessous de 30 cm le trente quatrième jour et en dessous de 70 cm dans La seconde moitié du cycle.

Cela traduit un effet du labour sur la vitesse d'avancement du front racinaire comme nous l'avons vu précédemment, mais aussi sur la vitesse de colonisation du sol en profondeur.

2.4.2. - Arachide semi-hâtive 57-422

Le profil racinaire moyen de l'arachide 57-422 entre 60 jours et la récolte (figure n° 9) est assez comparable à celui de l'arachide hâtive. Cependant, en surface, la densité racinaire semble légèrement plus importante dans le cas de l'arachide semi-hâtive, tandis que, en profondeur, la densité racinaire de cette variété devient plus faible que celle des variétés hâtives. Vu l'importance des racines profondes pour l'alimentation hydrique en cas de sécheresse, cela pourrait indiquer une moins bonne adaptation à des conditions sèches que les deux autres variétés, mais, bien sûr, il n'y a pas que le système racinaire qui a une influence sur la tolérance à la sécheresse de la plante.

2.5. - Evolution de La Longueur totale des racines au cours du cycle

Nous avons vu que de nombreux auteurs considèrent: la longueur totale des racines comme un critère très important dans les études de l'alimentation hydrique et minérale de la plante ; c'est pourquoi, malgré certaines difficultés de mesure, nous l'avons caractérisé.

2.5.1. - Variétés hâtives : 55-437 - 73-30

La courbe d'évolution de la longueur totale des racines d'arachide (figure n° 10, tableaux annexe n° 9 et 10) a une allure générale de courbe en S comparable à celle du poids total des racines.

L'évolution de la longueur totale des racines se ralentit à partir du quarantième ou du quarante cinquième jour puis s'arrête entre le cinquante cinquième et le soixante cinquième jour.

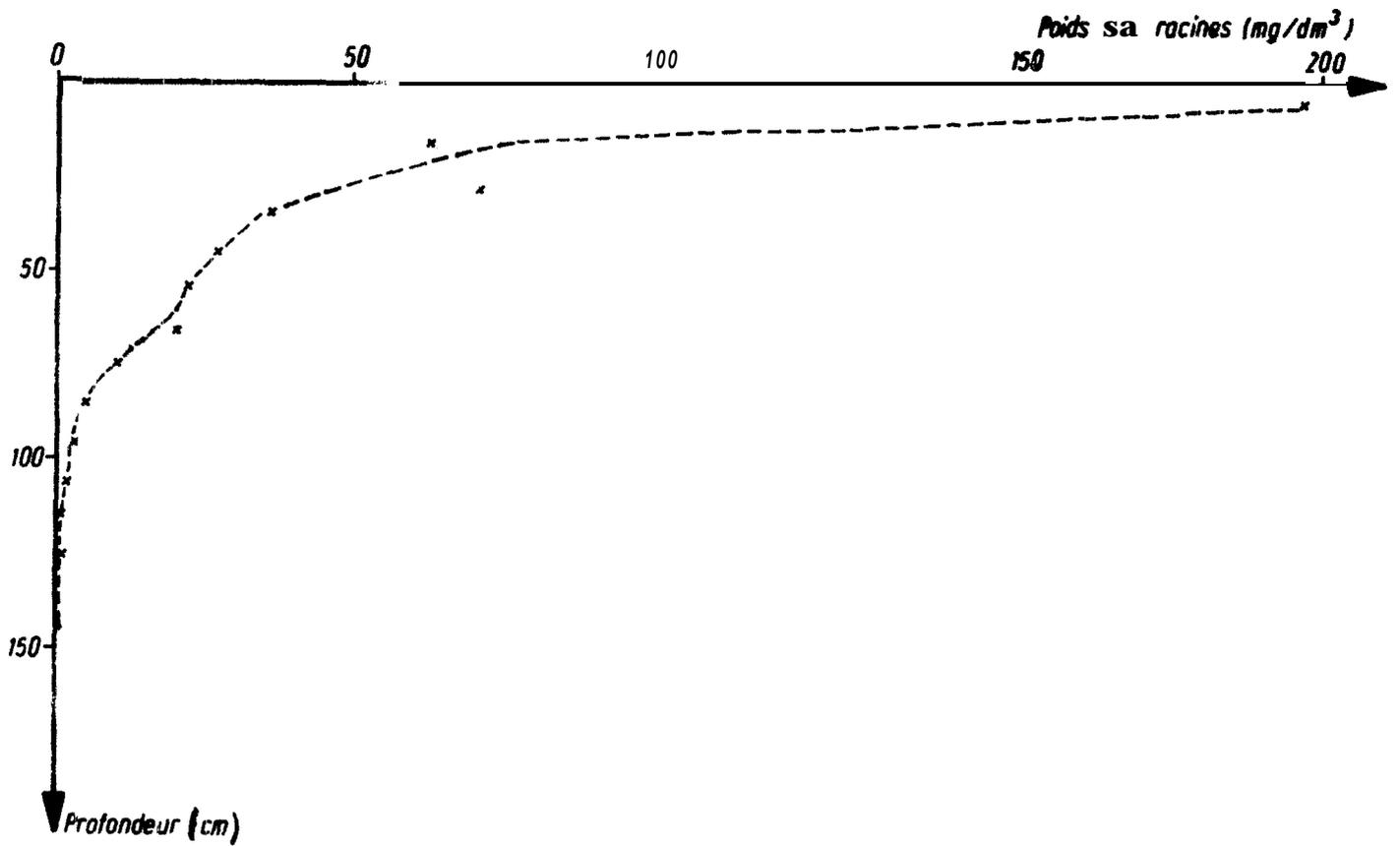


Fig.n° 9 Profil racinaire en mg/dm^3 arachide 57-422 entre 60 et 110j (labour)

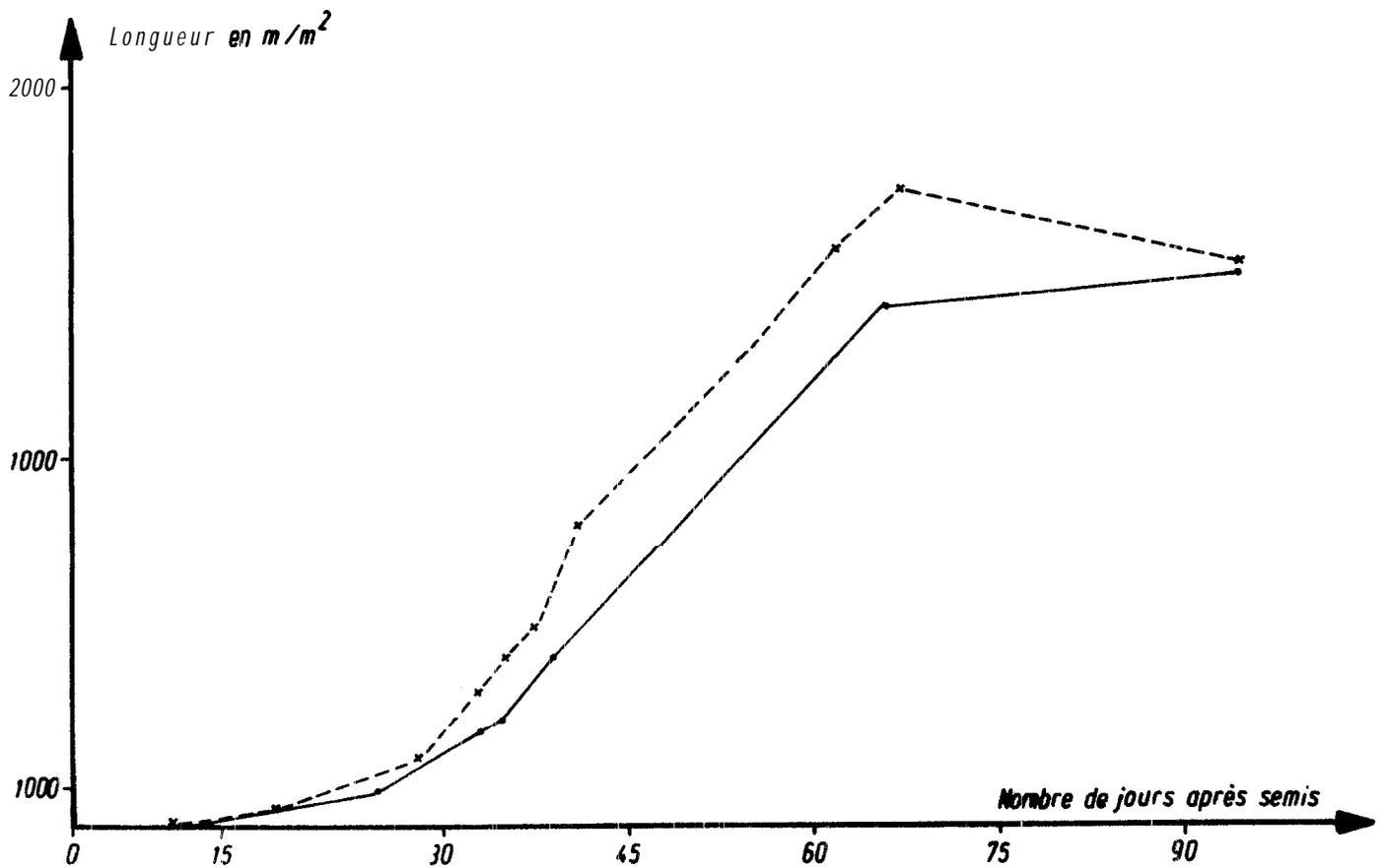


Fig.n° 10 Evolution de la longueur **totale** de l'**enracinement** de l'arachide hâtive (73-30 - 55-437) en fonction dut stade de végétation.

Entre huit et quarante jours, La courbe d'évolution de La Longueur totale des racines (en m/m^2 de culture) peut aussi être ajustée à une fonction exponentielle :

$$\text{Témoin : } L = 4,81e^{0,117 t}$$

$$n = 9 \quad r^2 = 0,976$$

$$\text{Labour : } L = 5,50e^{0,125 t}$$

$$n = 20 \quad r^2 = 0,947$$

Comme pour Le poids sec, La vitesse de croissance relative est légèrement plus importante sur Labour. On observe aussi que Les valeurs de La vitesse de croissance relative de La Longueur sont un peu supérieures à celles du poids sec ; La Longueur des racines augmente donc plus rapidement que le poids sec, ce qui peut traduire une évolution dans Le degré de finesse des racines ; cet aspect sera de nouveau étudié plus Loin.

La Longueur totale des racines passe par un maximum de $1700 m/m^2$ à soixante cinq jours, puis diminue légèrement. Au stade récolte, il n'y a plus de différence entre La Longueur totale de L'enracinement sur témoin et sur Labour ; elle est dans Les deux cas de $1500 m/m^2$. La baisse enregistrée sur Labour, en fin de cycle, peut être attribuée au hasard de L'échantillonnage, mais aussi à La dégérescence d'une partie du fin chevelu radiculaire Lorsque La plante est à maturité.

2.5.2. - Variétés semi-hâtives 57-422

Il n'a pas été possible de suivre l'évolution de la longueur totale de L'enracinement de La variété 57-422. Des mesures ont seulement été réalisées à deux stades de végétation : en début de cycle et à la récolte, sur témoin non Labouré. Les résultats (tableau annexe n°9) sont très comparables' à ceux obtenus aux mêmes stades de végétation sur les variétés hâtives., A la récolte, on trouve ainsi une longueur totale de L'enracinement de $1420 m/m^2$.

La Longueur totale des racines d'arachide est donc très grande puisqu'elle atteint un kilomètre par mètre carré de culture dès la moitié du cycle, pour arriver ensuite à des valeurs de 1500 à $1700 m/m^2$. Nous allons maintenant examiner comment se répartit cette Longueur dans le profil de sol, et Le degré de colonisation de celui-ci.

2.4. -- Répartition verticale de la longueur totale des racines dans Le profil de sol ~ distances moyennes entre Les racines

Si la longueur totale des racines est un critère important dans les mécanismes de l'alimentation hydrique et minérale, la façon dont celle-ci est répartie dans le profil de sol paraît aussi jouer un très grand rôle car, au champ, les possibilités d'alimentation hydrique et minérale pourront être très différentes suivant que cette longueur est essentiellement localisée dans les horizons superficiels, ou plus également répartie dans la profondeur colonisée.

C'est pourquoi, nous allons étudier la longueur moyenne des racines par unité de volume de sol à différentes profondeurs. Nous avons aussi exprimé cette colonisation du sol par les racines en calculant, à partir de la longueur, la distance moyenne qui sépare les racines (MAERTENS, 1974). Ce dernier critère dépend directement du premier, mais il permet d'avoir une meilleure "image" de la colonisation du sol, et de connaître les distances maximales que doivent parcourir l'eau et les éléments minéraux pour arriver aux racines.

2.6. 1. - Longueur

Les profils racinaires de l'arachide hâtive, à trente quatre jours et entre soixante et quatre vingt quinze jours, exprimés en m/dm^3 , par tranche de sol de 10 cm, apparaissent sur la figure n° 11 et les tableaux annexes n° 9 et 10. On observe que le gradient de longueur en fonction de la profondeur est sensiblement moins important que le gradient de poids de matière sèche des racines : pour une même longueur, le pivot et les grosses racines secondaires de surface ont un poids de matière sèche plus grand que les racines de profondeur qui comprennent peu de très grosses racines, et qui sont moins lignifiées.

L'effet du labour, sur la longueur des racines, est surtout visible en surface, dans la couche travaillée entre 0 et 20 cm à trente quatre jours et entre 10 et 20 cm à partir du sixième jour après, le semis. Il existe une zone médiane, entre 30 et 60 cm, dans laquelle l'enracinement du témoin semble plus développé. Puis, de nouveau en profondeur, on observe un effet du labour sur la densité racinaire exprimée en m/m^2 .

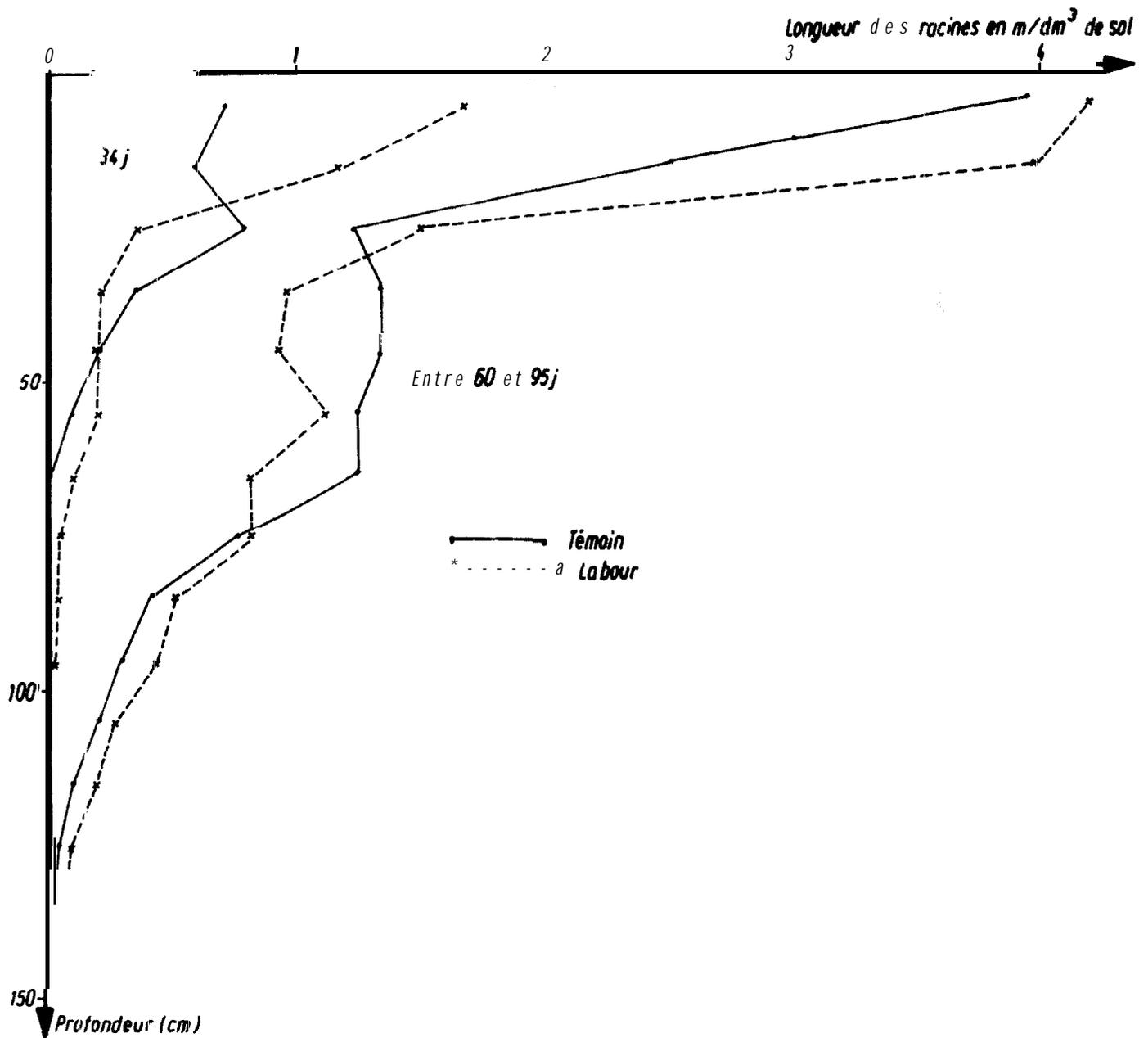


Fig. n° 11 Profils racinaires arachide hâtive 73-30 ii
34 j et entre 60 et 95 j : longueur des racines (en m/dm³ de sol)

2.6.2. - Distances moyennes entre les racines

L'évolution des distances moyennes entre les racines à différentes profondeurs, en fonction du stade de végétation, est représentée sur La figure n° 12. (in a aussi fait figurer les profils de distances moyennes entre les racines (figure n° 13) à trois stades de végétation : seizième, trente quatrième jour, et Lorsque L'enracinement a atteint sa phase de croissance nulle (après soixante jours de végétation>.

Ces résultats montrent que le degré d'exploration du profil de sol par les racines est encore assez faible au trente quatrième jour.

Mais, lorsque le système racinaire a atteint son plein développement, le degré d'exploration du profil par Les racines est bon dans le premier mètre du sol. Il est supérieur à ce que L'on pouvait prévoir à partir des seules mesures de densités racinaires exprimées en poids de matière sèche de racines (f igure n° 8). Dans Le premier mètre, les distances moyennes entre racines passent de 2 cm en moyenne entre 0 et 10 cm de profondeur à 6 cm entre 90 et 100 cm de profondeur, sans qu'il y ait de différence importante entre témoin et Labour. En dessous de 100 cm, les distances moyennes augmentent rapidement, surtout sur le témoin. Entre 100 et 140 cm, le degré d'exploration du sol par les racines est nettement supérieur sur labour.

Les résultats obtenus mettent bien en relief l'intérêt de la mesure de La longueur et surtout de La distance moyenne entre les racines pour caractériser un système racinaire. En effet, si l'on utilise uniquement le critère poids sec comme sur La figure n° 8, on pourrait en conclure qu'il y a toujours très peu de racines en profondeur, en dessous de 30 cm, et que l'essentiel de l'alimentation de la plante se fait donc dans cet horizon, En fait, à partir de cinquante à soixante jours après le semis, le sol paraît bien colonisé par les racines sur presque un mètre de profondeur.

2.7. - Variation de la densité racinaire en fonction de la distance par rapport à la ligne de semis (homogénéité de la colonisation dans l'interligne)

Tous les résultats précédents ont été obtenus à partir de prélèvements par tranches de sol de 10 cm sur une surface de 0,45 x 0,60 m contenant en son milieu une ligne d'arachide semée à 0,45 m d'écartement (dans le cas de

L'arachide hâtive). Cela a permis d'étudier le gradient vertical, mais non le gradient horizontal.

Cette étude du gradient horizontal a été abordée au stade récolte sur L'arachide 73-30, en séparant la surface de prélèvement habituelle en sept bandes de 6,4 cm de farge et de 60 cm de Long, plus ou moins espacées de la ligne d'arachide et de part et d'autre de celle-ci. Nous avons donc pu étudier la variation dans l'interligne du poids sec des racines exprimé en g/dm^3 de sol (figure n° 14) et de la distance moyenne entre les racines en cm (figure n° 15).

On s'aperçoit que, si l'on excepte la zone superficielle (0-10 cm) située immédiatement sous la ligne d'arachide (0-3,2 cm) et comprenant les pivots, il n'apparaît pas de gradient très marqué de densité racinaire en fonction de la distance par rapport au pied. Si l'on considère les distances moyennes entre les racines, le gradient est encore plus faible.

Ces résultats demanderaient à être confirmés, car nous n'avons pu réaliser que deux répétitions ; mais il semble que, en fin de cycle, l'exploration racinaire de l'interligne soit bonne et tout à fait comparable à celle de la zone située immédiatement sous le pied.

2.8. - Evolution de la moyenne et de l'écart-type de la population des diamètres en fonction de la profondeur et du stade de végétation

2.8.1. - Variété hâtive (73-30)

A partir des mesures de longueur, de surface diamétrale et de volume des racines, nous avons pu mesurer, sur un certain nombre de prélèvements, les diamètres moyens des échantillons de racines prélevées dans les différents horizons, et les écarts-types des populations de diamètres. Les résultats détaillés figurent dans les tableaux annexe n° 11 et 12.

Une synthèse est présentée sur la figure n° 16 et dans les tableaux n° 8 et 9. Dans l'horizon 0-10 cm, nous avons éliminé les pivots dont la morphologie en surface est très différente de celle des autres racines.

D'une manière générale, à chacun des stades de végétation étudiés, le diamètre moyen des racines augmente régulièrement avec la profondeur. A un même niveau, le diamètre moyen diminue assez rapidement entre le début de cycle

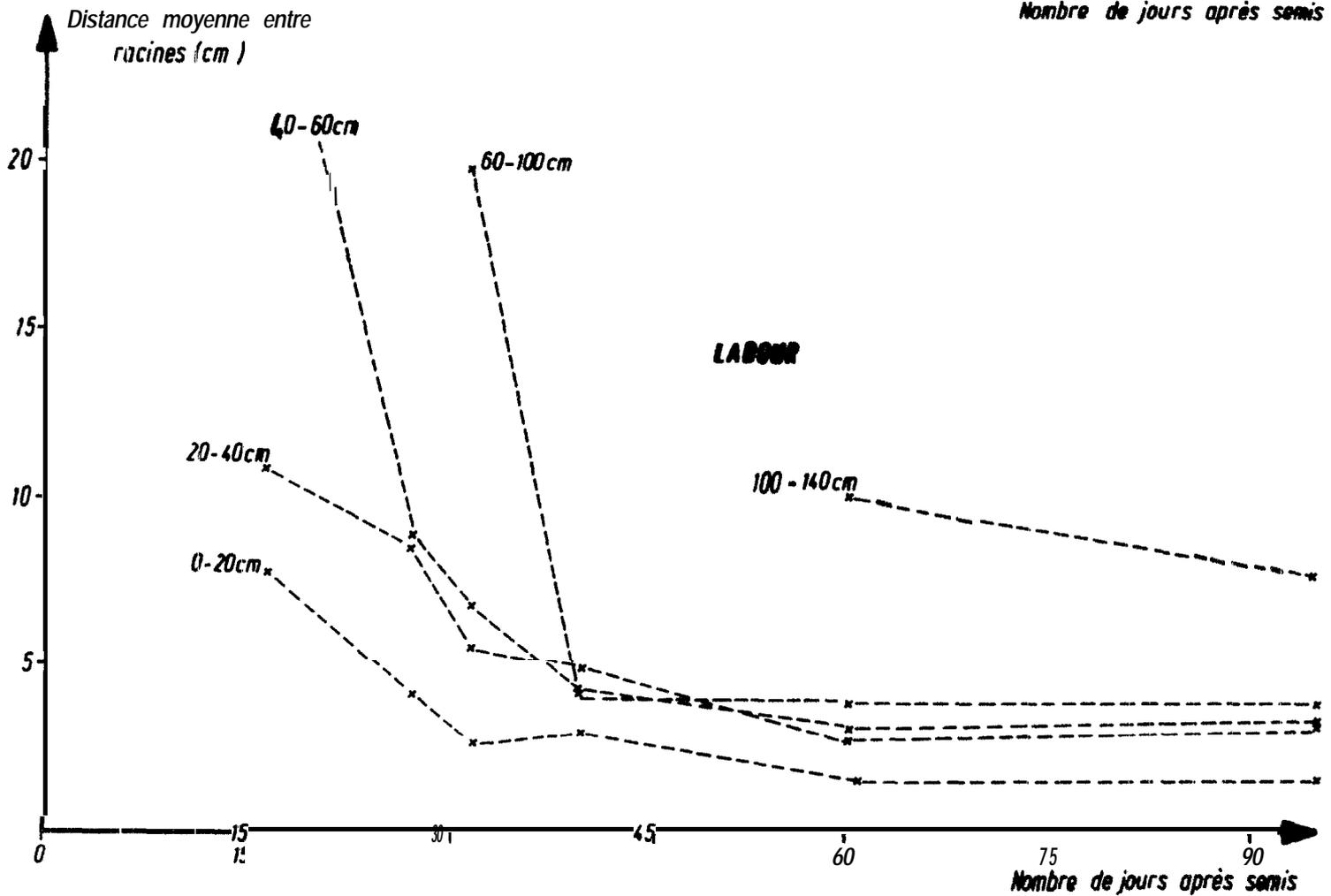
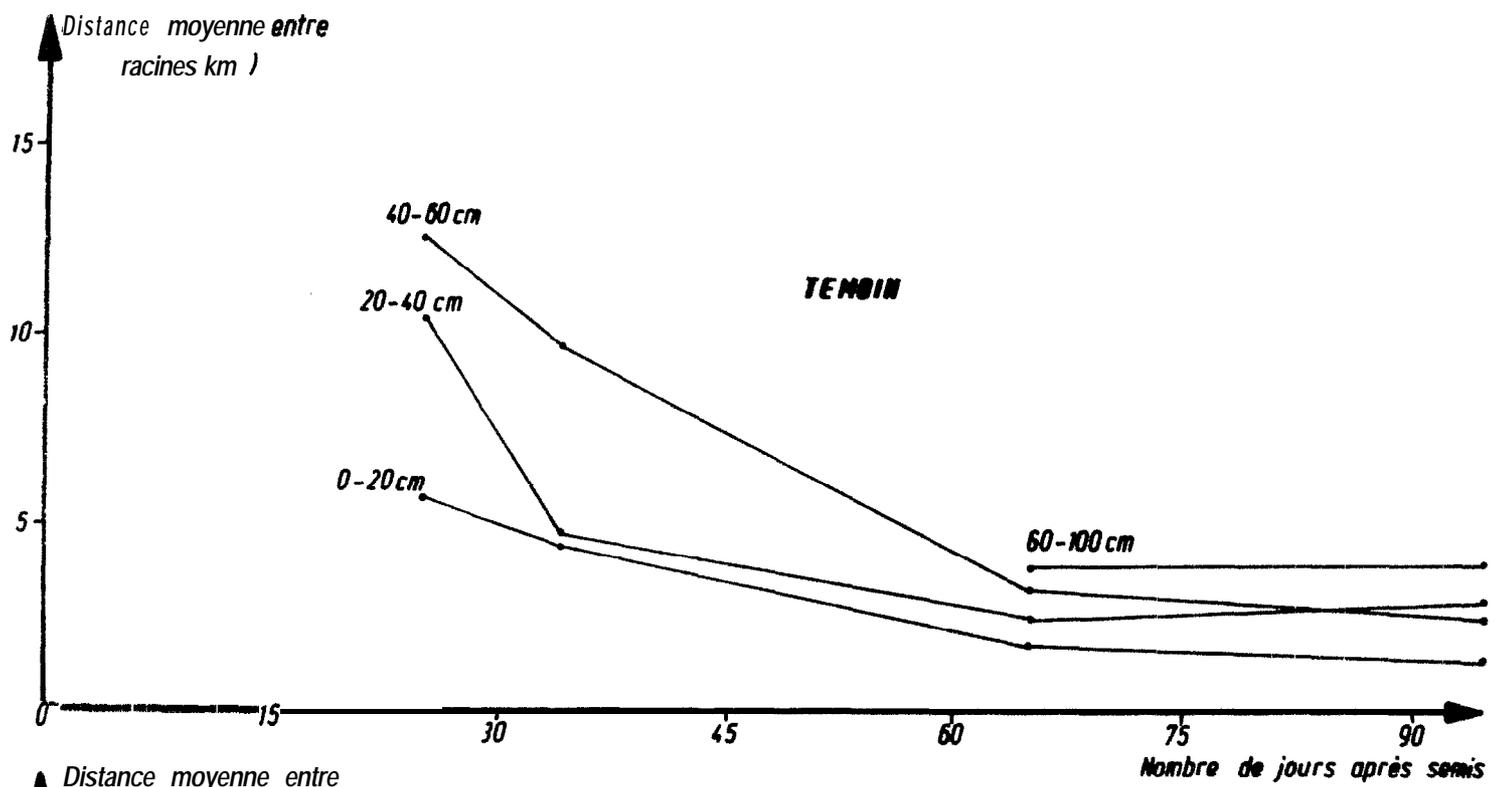


Fig. n° 12 Evolution de la distance moyenne entre les racines d'arachide hôte (73-30, 55-437) par niveau de u r en fonction du stade de végétation

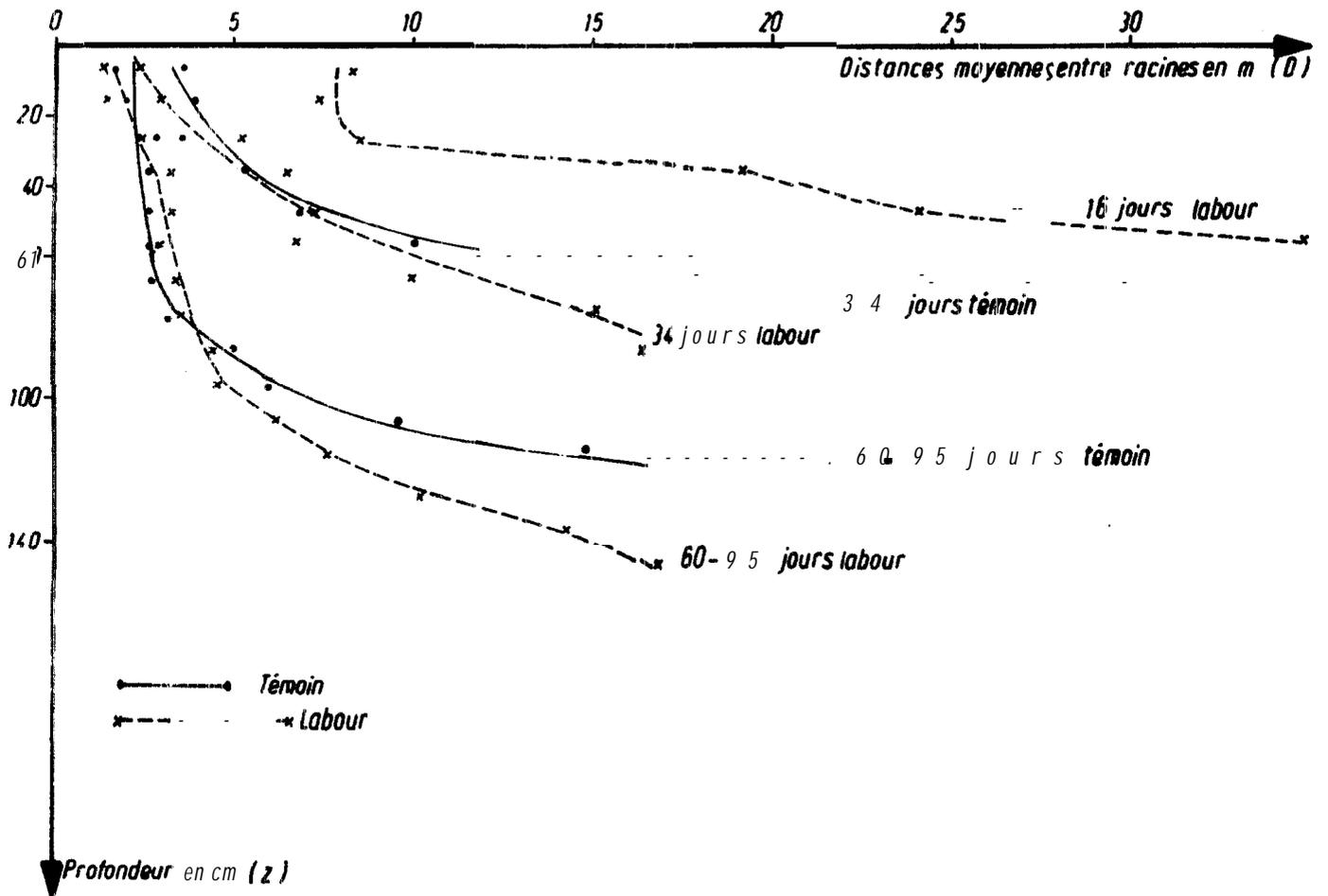


Fig. n° 13 Profils de distances moyennes entre les racines d'arachide var. 73-30 et 55-437 entre 16 et 95j (en cm)

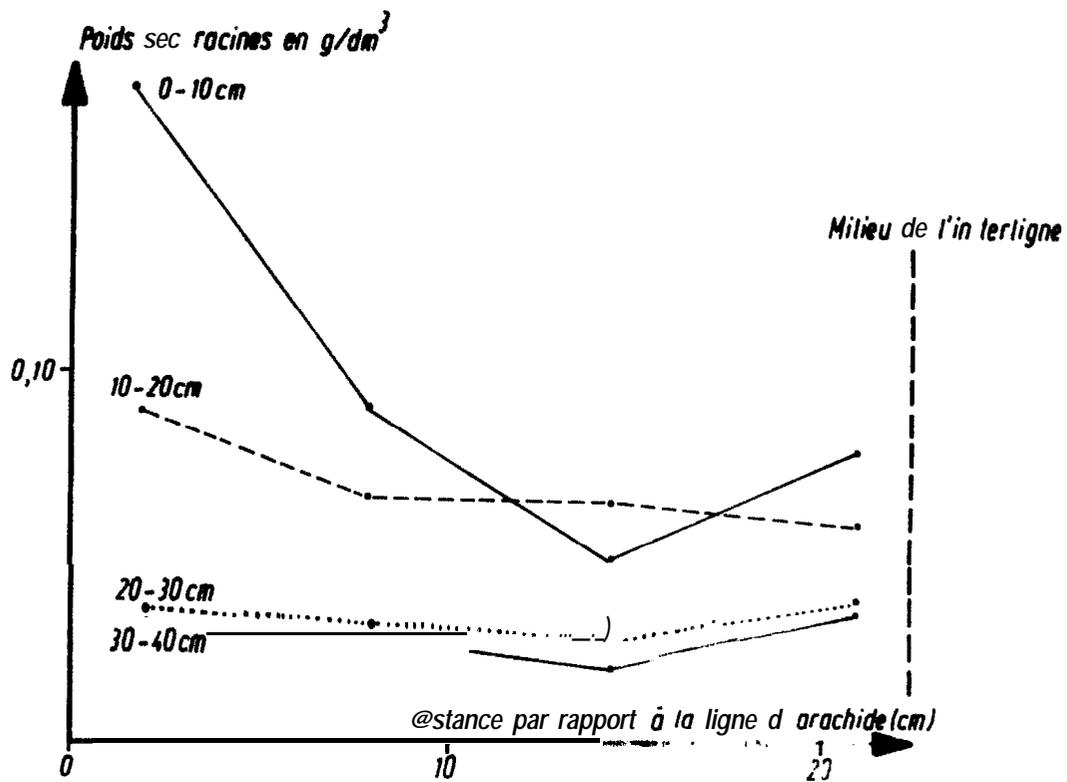


Fig.n° 14 Variation de la densité racinaire de l'arachide 73-30 en fonction de la profondeur et de la distance par rapport à la ligne de semis

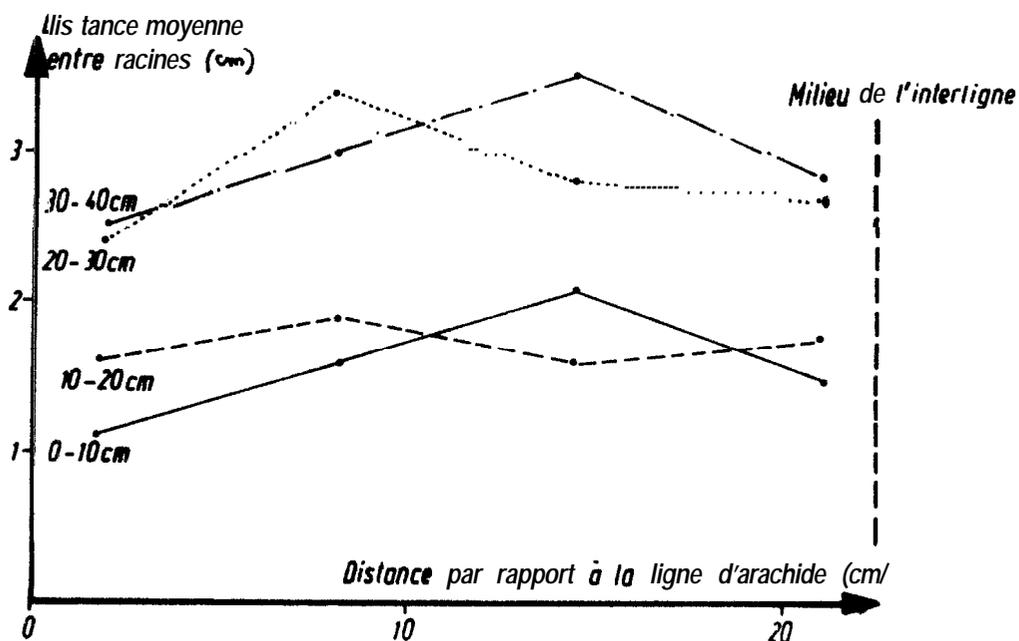


Fig.n° 15 Variation de la distance moyenne entre racines de l'arachide 73-30 en fonction de la profondeur et de la distance par rapport à la ligne

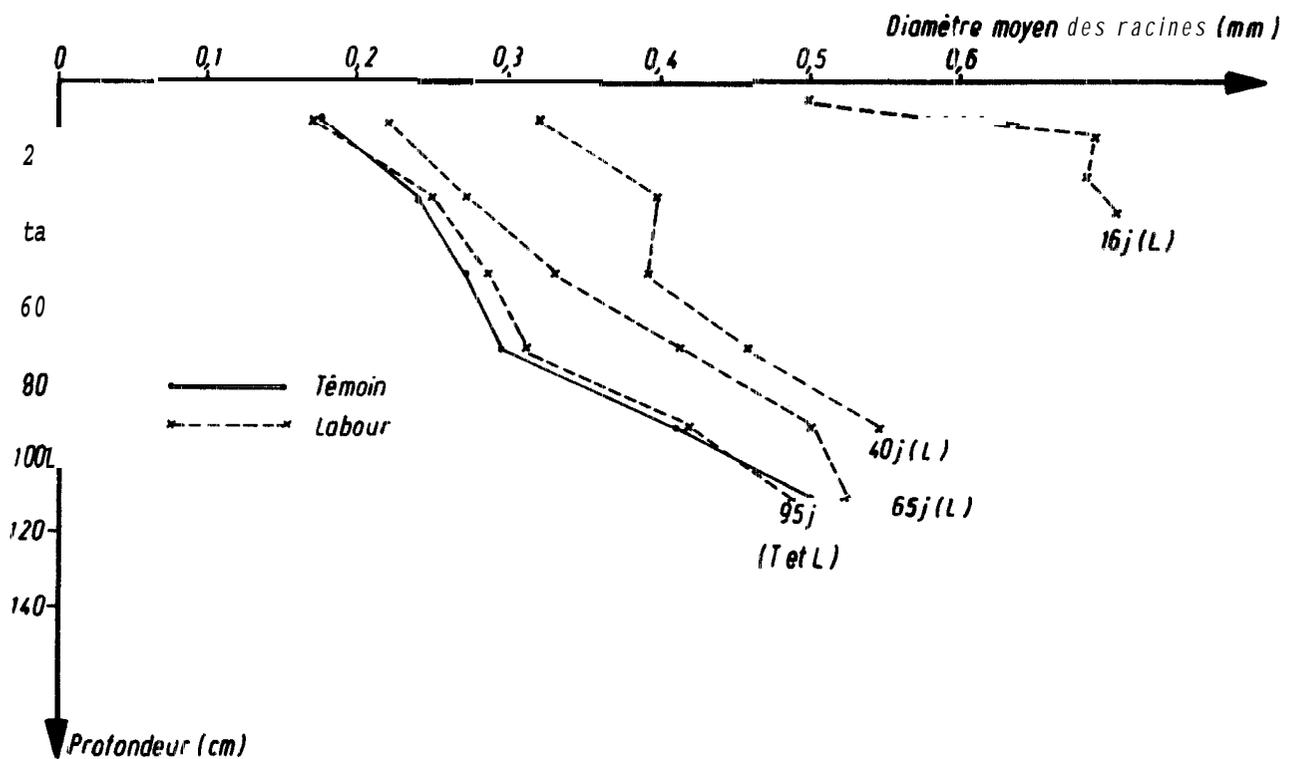


Fig. II.° 16 Evolution du diamètre moyen des racines d'arachide variété 73-30 entre 0 et 95 j avec et sans labour (mm)

et le soixante cinquième jour, le diamètre moyen des racines passe de 0,2 mm en surface, à 0,5 mm à 100 cm de profondeur.

On dispose de la comparaison témoin/labour uniquement à la récolte. A ce stade, il n'y a aucun effet du travail du sol sur les diamètres moyens mesurés.

La mesure de L'écart-type de La population des diamètres permet d'estimer l'étendue de La variation des diamètres d'un échantillon de racines, Un écart-type important indique l'existence d'une forte variation autour de La moyenne, donc d'un enracinement bien ramifié. Dans le tableau n° 9, Les valeurs du rapport écart-type des diamètres/diamètre moyen, obtenues à partir des résultats du tableau n° 8, permettent de mieux saisir la dispersion des diamètres par rapport à la moyenne.

En début de cycle, l'écart-type est faible : l'enracinement est surtout composé du pivot et des racines primaires de diamètre assez important et peu ramifiées. A partir du quarantième jour et jusqu'à la récolte, l'écart-type est plus important et relativement constant dans le premier mètre. Compte tenu des variations de diamètre en fonction de la profondeur et du stade de végétation, on peut en conclure que le degré de ramification des racines d'arachide diminue toujours assez nettement avec la profondeur, et qu'il augmente d'abord rapidement entre le seizième jour et le quarantième jour, puis plus lentement ensuite.

La comparaison témoin/labour au stade récolte fait ressortir des valeurs de L'écart type systématiquement supérieures sur Labour, pour un diamètre moyen équivalent, mais Les différences sont très faibles.

Au stade récolte, Les degrés de ramification des racines d'arachide cultivée avec ou sans labour, sont donc assez comparables. Toutefois, un certain nombre d'observations effectuées sur des profils culturaux à des stades plus précoces semblent montrer l'existence d'un effet du labour sur Le degré de ramification du système racinaire, surtout dans la couche travaillée.

Tableau n° 8 : Evolution de la moyenne (en mm) et de l'écart-type de la population des diamètres d'arachide en fonction du stade de végétation et de la profondeur

VARIETES		73-30										57-422	
TRAIITEMENTS		Avec labour						Témoin				Témoin	
STADE DE VEGETATION		16-17 jours premiers bourgeons; floraux		40 jours (floraison)		65 jours formation des gousses		95 jours Récolte		95 jours		110 jours Récolte	
Profondeur (cm)		Diamètre moyen	Ecart type	Diamètre moyen	Ecart type	Diamètre moyen	Ecart type	Diamètre moyen	Ecart type	Diamètre moyen	Ecart type	Diamètre moyen	Ecart type
0 - 20		0,59	0,25	0,33	0,34	0,22	0,33	0,17	0,31	0,18	0,29	0,15	0,30
20 - 40		0,63	0,23	0,40	0,36	0,27	0,33	0,25	0,35	0,24	0,33	0,17	0,36
40 - 60		-	-	0,39	0,35	0,33	0,34	0,29	0,35	0,27	0,29	0,21	0,33
60 - 80		-	-	0,46	0,37	0,42	0,33	0,31	0,34	0,30	0,33	0,27	0,32
80 - 100		-	-	0,54	0,39	0,50	0,30	0,42	0,37	0,41	0,36	0,28	0,32
100 - 120		-	-	0,29	0,20	0,52	0,28	0,49	0,36	0,50	0,28	0,47	0,35
		0,64	0,24	0,40	0,34	0,38	0,32	0,32	0,35	0,32	0,31	0,26	0,33

Tableau n° 9 : Evolution du rapport écart-type/moyenne des diamètres d'arachide en fonction du stade de végétation et de la profondeur

		73-30						57-422
		Avec labour				Témoin		Témoin
Profondeur (cm)		16-17 jours	40 jours	65 jours	95 jours	95 jours	110 jours	
0 - 20		0,42	1,03	1,5	1,82	1,61	2,00	
20 - 40		0,34	0,90	1,22	1,40	1,38	2,12	
40 - 60			0,90	1,03	1,21	1,137	1,57	
60 - 80			0,80	0,79	1,10	1,10	1,19	
80 - 100			0,72	0,60	0,88	0,88	1,14	
100-120			0,69	0,54	0,73	0,56	0,74	

2.8.2. ▀ Variété semi-hâtive (57-422)

Le diamètre moyen et l'écart-type de La population des diamètres de L'arachide 57-422 n'ont pu être mesurés qu'au stade récolte sur terrain Labouré (tableau n° 8).

La comparaison avec La variété 73-30, au même stade de végétation, fait ressortir une différence assez sensible dans Les résultats du diamètre moyen. Celui-ci est systématiquement plus faible sur La variété 57-422 avec une différence moyenne de 20 %. Par contre, les écarts-types des diamètres sont comparables sur Les deux variétés. La variété 57-422 semble donc avoir un enracinement un peu plus fin et un peu mieux ramifié. Cette différence est peut être due, en partie, à une densité de semis plus faible sur La variété 57-422 dont L'interligne est de 0,60 m, alors qu'elle est de 0,45 m sur La variété 73-30.

Les différents critères de caractérisation utilisés permettent de mieux comprendre L'évolution de l'enracinement au cours de La végétation.

La croissance racinaire de l'arachide exprimée en poids de matière sèche ou en longueur suit une courbe en S classique, dont la première partie est de type exponentiel.

On peut La décomposer en trois phases (les quelques chiffres moyens cités correspondent plus particulièrement à une variété hâtive cultivée avec labour) :

- ▀ en tout début de cycle, on assiste à l'établissement du pivot dont l'élongation verticale est d'abord très rapide mais qui constitue dans Les premiers jours le seul axe de croissance,

- ▀ à partir du vingtième jour environ, Lorsqu'apparaissent Les premières fleurs, la rhizogénèse à partir du pivot devient importante. Elle se fait d'abord dans les horizons de surface, et se poursuit jusqu'au cinquantième jour, c'est à dire pendant toute la phase de La floraison utile. Il y a une augmentation rapide du poids et de La Longueur due à L'élongation des racines

apparues sur le pivot, mais surtout à une ramification intense, puisque le diamètre moyen des racines diminue rapidement tandis que l'écart-type des diamètres augmente. En profondeur, outre les pivots, on ne trouve que quelques racines, de diamètre important, peu ramifiées,

- vers le cinquantième jour, la croissance du pivot s'arrête à une profondeur de 150 cm environ ; la longueur totale des racines et le poids sec total ont presque atteint leurs valeurs maximales. Jusqu'à la récolte, la colonisation va rester stable, ou même parfois légèrement régresser dans les derniers jours du cycle dans les horizons de surface tandis qu'elle va se poursuivre dans les horizons de profondeur, mais plus lentement.

Vers la fin du cycle, le profil de sol est bien colonisé sur presque 100 cm; par contre, entre 100 et 150 cm, la colonisation décroît fortement. La fin de la croissance rapide correspond au début de la phase la plus active de la formation des gousses.

Grâce à l'élongation rapide vers les horizons de profondeur, l'arachide paraît donc bien adaptée à des conditions précaires d'alimentation hydrique en début de cycle.

Dans les tous premiers jours, le pivot peut dépasser la couche de sol soumise à l'évaporation, au moins lorsque le front d'humectation du sol est assez profond pour que le sol sec sous-jacent ne constitue pas une barrière à sa croissance. La prospection réelle du profil est faible en début de végétation, mais les besoins en eau sont aussi très modestes. Ensuite, lorsque les besoins en eau augmentent, la colonisation des horizons de surface se fait rapidement. Le labour paraît jouer un certain rôle sur la vitesse d'élongation en début de cycle, en diminuant la résistance mécanique du sol à la pénétration des racines, ce qui aboutit à une prospection plus rapide et meilleure des horizons de profondeur même si l'effet global sur l'ensemble du système racinaire n'est pas très marqué.

III. - DEVELOPPEMENT DU SYSTEME RACINAIRE DU MIL AVEC ET SANS TRAVAIL DU SOL

Nous allons maintenant étudier l'enracinement fasciculé d'une céréale, le mil, dont la morphologie est tout à fait différente de l'arachide.

Il s'agit d'une plante de haute taille et à fort **tallage**. Les grains sont semés par poquets avec des écartements entre poquets de 1 m x 1 m. Le semis se fait en sec, avant la première **pluie**, pour que la plantule puisse mieux profiter de celle-ci.

On procède à un démariage entre le dixième et le quinzième jour pour ne laisser que trois plantes par poquet. Ensuite, les plantes produisent un grand nombre de talles dont une partie seulement sera fertile. Très vite, les trois pieds de chaque poquet ne sont plus isolables, et le poquet peut **être** assimilé à un individu pourvu de nombreuses talles. Malgré la très faible densité de semis (10 000 poquets/ha), le végétal arrive à bien couvrir la surface, et des semis plus denses n'améliorent pas les rendements.

Le **mil** a donc une morphologie et un mode de culture très différents de l'arachide ; toutefois, cette plante possède une **longueur** de cycle comparable à celle des variétés hâtives d'arachide étudiées précédemment (mil : 90 jours, arachide : 95 jours). De plus, ces variétés hâtives de **mil** et d'arachide ont généralement la même zone de culture dans les parties nord et centre du Sénégal soumises aux aléas pluviométriques.

Nous avons étudié l'enracinement de cette plante dans le même type de sol (sol dur sableux) et le plus souvent sur les mêmes expérimentations. Cela permettra, malgré les différences de morphologie et de mode de culture, de procéder à certaines comparaisons.

3.1. - Observations sur la germination et le début de cycle

La racine séminale apparaît de 24 à 48 heures après le semis ; cette racine a un géotropisme positif très prononcé et sa croissance est rapide. Dans des conditions optimales de germination, 5 jours après le début de **celle-ci** et 3 jours après le début de la levée, la longueur de cette racine est de 10 cm et son diamètre de 1 mm environ. A ce stade, elle possède déjà un chevelu **racinaire** assez important mais de faible longueur : La plupart de ces radicelles ont une longueur de l'ordre de 1 cm et leur diamètre est très faible.

Au stade 3 feuilles, c'est à dire 9 à 10 jours après le début de la germination, la première racine adventice apparaît au niveau du collet, juste en dessous de la surface du sol. Cette racine va rester dépourvue de racines

secondaires pendant plusieurs jours mais possède des poils absorbants. Elle prend au départ une position proche de l'horizontale, puis sa croissance s'oriente peu à peu vers une direction oblique subverticale, si les conditions de milieu sont favorables.

Très rapidement, d'autres racines vont apparaître au niveau du collet puis des premiers noeuds, très proches, du collet. Leur comportement sera comparable à celui de la première racine adventive.

Quinze à dix huit jours après le début de la germination, la plante est au stade début tallage. La racine séminale est encore visible, mais elle est en cours de nécrose et va bientôt disparaître. Si la plante a pu bénéficier de conditions de croissance favorables, l'enracinement se compose déjà de plusieurs racines adventives ; celles-ci sont en pleine phase d'élongation suivant une direction oblique, leur longueur maximale est de 30 cm et elles possèdent encore très peu de racines secondaires.

3.2. - Nombre de racines adventives primaires par poquet et par talle

La période d'initiation des racines adventives se situe surtout entre le quinzième et le soixantième jour (floraison). A la récolte, chaque pied compte en moyenne entre 200 et 300 racines (tableau n° 10 et tableau annexe n° 14) soit environ 25 racines par talle. Au stade de la récolte et dans les conditions d'expérimentation étudiées, il n'y a pas d'effet du labour sur le nombre total de racines par poquet et par talle. Toutefois, des observations plus ponctuelles réalisées à la fin du stade tallage (trente à quarante jours) ont montré qu'à ce stade, le nombre total de racines par talle était comparable sur les deux traitements ; mais, du fait d'un rythme de tallage plus rapide sur le labour, le nombre total de racines par poquet était plus élevé.

Tableau n° 10 : Nombre de racines de mil par poquet et par **talle** au stade récolte, avec et sans Labour

	Témoi n		Labour	
	Moyenne	Erreur standard (s)	Moyenne	Erreur standard (s)
Nombre de pieds par poquet	3		3	
Nombre de talles par poquet	11	3,7	10	3,0
Nombre total de racines par poquet	262	63	265	51
Nombre de racines par talle	26	9,7	27	7,4
Poids des pailles par poquet (en g)	566	211	630	230
Nombre de talles fertiles par poquet	6	2,7	6	2,6

3.3. - Evolution du front racinaire au cours du cycle

L'évolution du front racinaire est représenté sur La figure n° 17. Contrairement à L'arachide, cette évolution se poursuit tout au Long de La végétation. Malgré des résultats assez hétérogènes, on peut distinguer trois phases légèrement distinctes : on assiste à une augmentation de La vitesse d'avancement à partir du quinzième jour, puis à une diminution de cette vitesse à partir du quarante cinquième jour. Par ailleurs, il n'y a apparemment pas d'effet du Labour. C'est pourquoi, nous avons calculé les ajustements avec L'ensemble des points témoin + Labour.

Nous avons vu qu'en tout début de cycle, c'est d'abord Le système racinaire **seminal** qui se développe, mais celui-ci reste superficiel ; le système racinaire adventif commence à apparaître vers Le dixième jour et sa profondeur va rapidement dépasser celle du système séminal. Cependant, après quinze jours de végétation, La profondeur du front racinaire est encore faible : elle est comprise entre 20 et 30 cm, La vitesse d'avancement du front est donc de 1,5 à 2 cm/jour au moment de La Levée.

A partir du quinzième jour, la courbe obtenue peut être assimilée à deux droites :

$$= 15-38 \text{ jours} : Z = 3,33 t - 23,8$$

$$n = 28 \quad r = 0,980$$

$$= 45-90 \text{ jours} : Z = 1,22 t + 66,9$$

$$n = 26 \quad r = 0,750$$

L'évolution du front racinaire entre l'apparition des racines de tallage et la récolte (15-90 jours) peut aussi s'ajuster avec un coefficient de corrélation hautement significatif à une fonction logarithmique :

$$Z = 85,12 \ln t - 208$$

$$n = 54 \quad r^2 = 0,955 \quad F = 1080$$

A partir du quinzième jour, lorsque le système adventif dépasse le système séminal, il y aurait donc une réduction progressive de la vitesse d'avancement du front jusqu'à la récolte, avec un point d'inflexion situé vers la moitié du cycle. Au début, cette vitesse est de 3 à 3,5 cm/jour, elle est donc plus rapide que celle de l'arachide. La profondeur du front racinaire passe ainsi de 20-30 cm le quinzième jour à environ 120 cm le quarante cinquième jour. Ensuite et jusqu'à la récolte, la vitesse n'est plus que de 1,5 à 1 cm/jour et la profondeur maximale de l'enracinement atteint en moyenne 180 cm en fin de cycle. Cette diminution de la vitesse d'évolution du front correspond à la fin du stade montaison et à l'approche de l'apparition des premiers épis (vers le cinquantième jour).

Dans nos conditions, l'enracinement du mil reste superficiel au cours des quinze premiers jours, mais dans la seconde moitié de son cycle, il prospecte une profondeur de sol importante.

Les profondeurs maximales d'enracinement citées dans la Littérature sont très variables. D'après KANIT' KAR (1944), en Inde, le système racinaire du mil. est limité à 120 cm même en sol profond. Par contre, BEGG et al (1964) trouvent des racines jusqu'à 360 cm. Finalement ce sont des résultats obtenus en Australie (WESTELAAR et NORMAN, 19601, 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.

Mais, la profondeur maximale de l'enracinement ne correspond qu'à un potentiel de réserves hydriques et minérales dans le sol disponibles pour la plante ; Le pouvoir d'extraction réel de l'eau et des éléments minéraux va dépendre de la colonisation du sol dans les différents horizons, ce que nous allons examiner par la suite.

3.4. - Evolution du poids de matière sèche totale des racines et du rapport parties aériennes/racines

Avant d'étudier la répartition de l'enracinement dans le profil, nous allons examiner l'évolution du poids total de matière sèche des racines au cours du cycle. Entre la germination et le 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. 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 en fonction des conditions de milieu, de la rapidité de la germination et même semble-t-il de leur position initiale à l'intérieur du poquet.

Nous avons donc pris comme point de départ de l'évolution de la croissance de l'enracinement Le quinzième jour, soit quelques jours après le déma ri age.

A partir du quinzième jour, la croissance des racines exprimée en grammes de matière sèche par mètre carré (ou par poquet de 3 pieds) suit une courbe en S (figure n° 18) dont l'allure est comparable à celle de l'arachide. Entre quinze et cinquante jours, l'évolution du poids sec des racines s'ajuste aussi à une fonction exponentielle de type : $x = x_0 e^{rt}$

$$\text{Témoins P} = 0,010 e^{0,148t}$$

$$n = 17 \quad r^2 = 0,956 \quad F = 335$$

$$\text{Labour l} = 0,011 e^{0,163t}$$

$$n = 16 \quad r^2 = 0,939 \quad F = 219$$

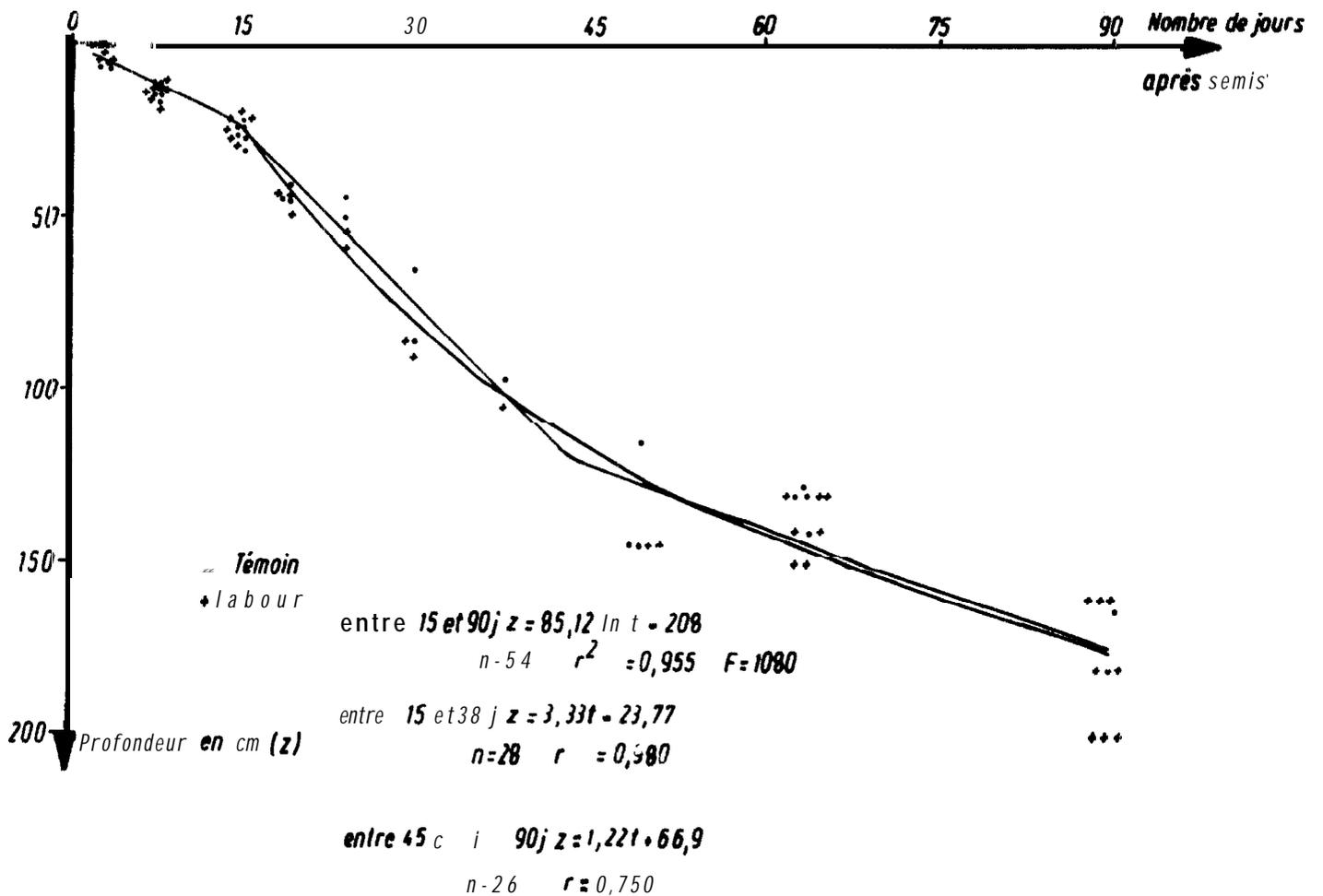
La vitesse d'augmentation du poids des racines est donc plus rapide avec labour qu'en absence de Labour. A partir du cinquantième jour (apparition des premiers épis), La croissance pondérale des racines devient très faible avec labour, avec même une Légère diminution du poids de matière sèche en fin de cycle ; tandis que, sur Le témoin, La croissance se poursuit Lentement jusqu'à La récolte. En fin de cycle, la différence entre les deux traitements devient négligeable. La biomasse racinaire est alors de 37 grammes par poquet (soit par m²) avec Labour et de 34 grammes sur Le témoin.,

Les poids des parties aériennes de mil suivent eux aussi une courbe en S classique mais la phase de croissance rapide est moins accentuée et se prolonge plus longtemps que celle des racines. La croissance pondérale de L'appareil végétatif s'arrête au moment de La floraison, entre Le soixantième et Le soixante dixième jour (figure n° 18).

Malgré une assez forte hétérogénéité des résultats, L'évolution du rapport poids sec parties aériennes/racines (PA/R) paraît comporter plusieurs phases (figure n° 19) : 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 poids maximum, tandis que L'appareil végétatif continue de se développer et de se lignifier ; ensuite,, en fin de cycle, une nouvelle phase de faible augmentation. Si l'on tient compte de L'ensemble des parties aériennes (pailles + organes reproducteurs), La phase d'augmentation rapide du rapport parties aériennes/racines se prolonge jusqu'à La récolte. En fin de cycle, Le poids de matière sèche des racines est très faible par rapport au poids des parties aériennes. Toutefois, il ne s'agit Là que d'une tendance, Les résultats de chaque prélèvement individuel sont hétérogènes, Les conditions édaphiques paraissent jouer un rôle non négligeable, en particulier L'humidité du sol.

3. 5. - Répartition du poids sec des racines en fonction de la profondeur

Sur La figure n° 20, on peut suivre l'évolution des poids secs des racines à différentes profondeurs du sol, au cours du cycle de La plante. Les différences maximales importantes entre témoin et Labour observées jusque vers Le cinquantième jour se retrouvent assez bien dans chacun des horizons.



**Fig.-n° 17 Evolution du front racinaire
 du mil Souna**

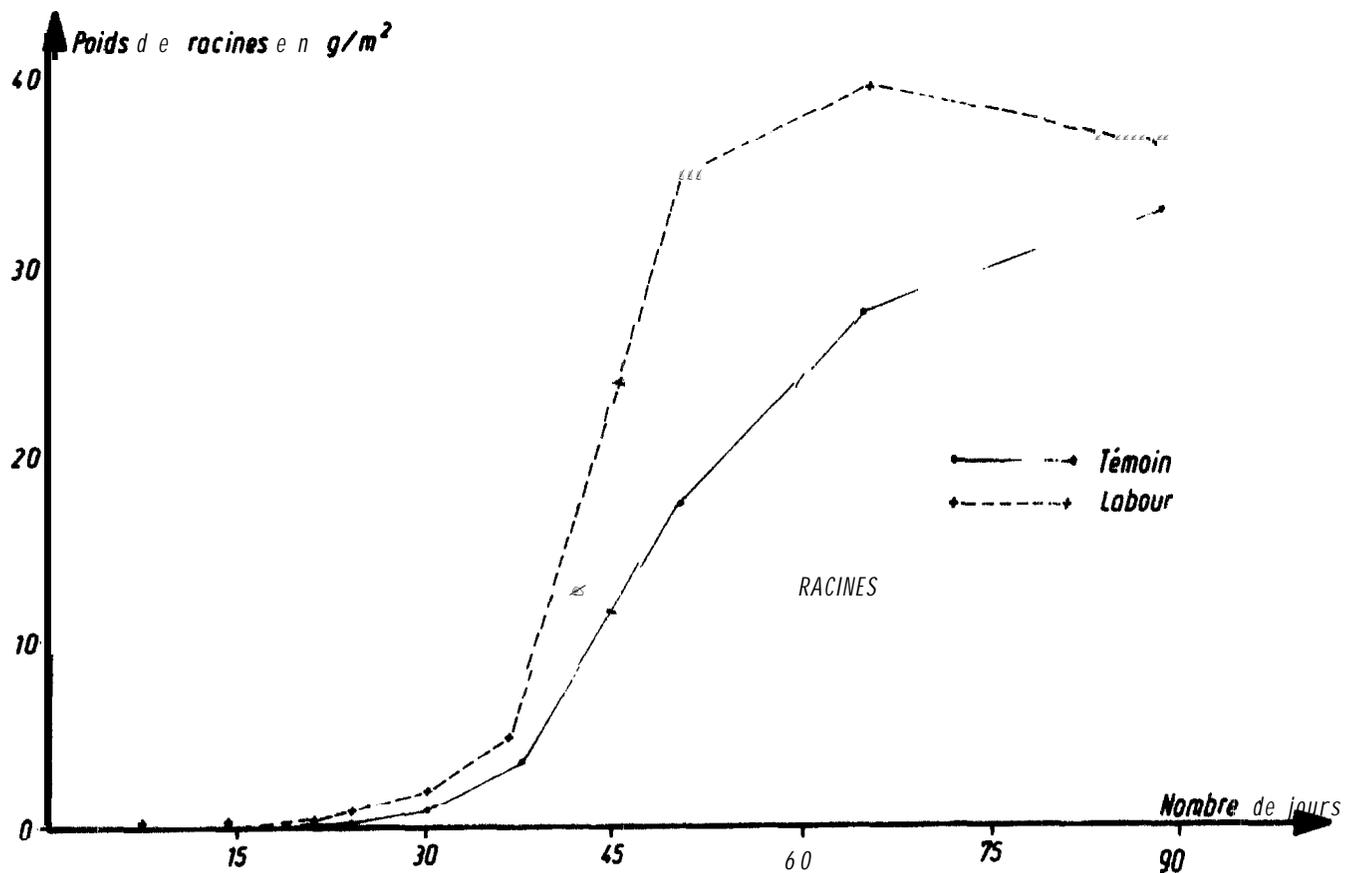
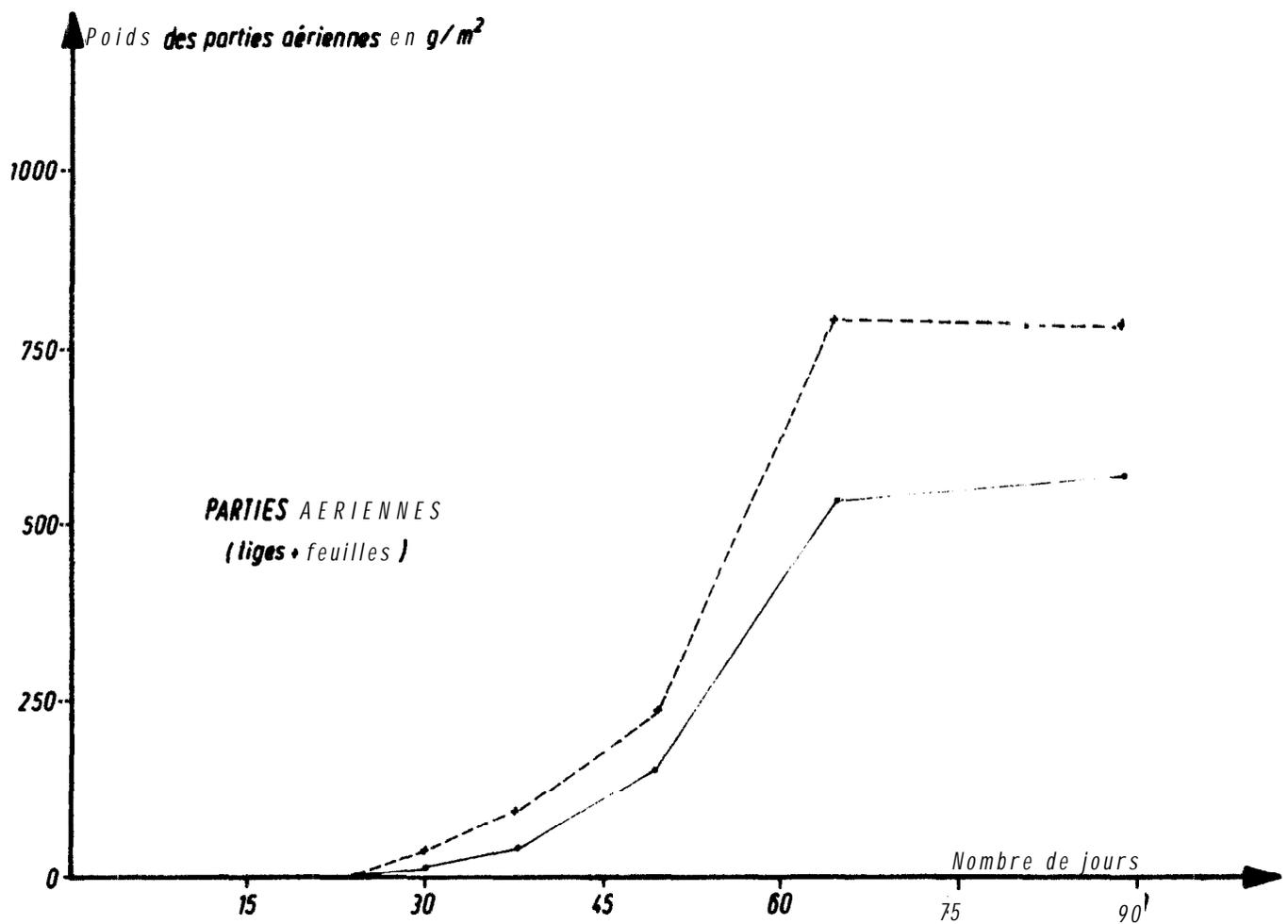


Fig. n° 18 Evolution du poids sec total des racines de mil Sound et des parties aériennes des pieds prélevés en g/m^2 avec 1 poquet de 3 plantes par m^2

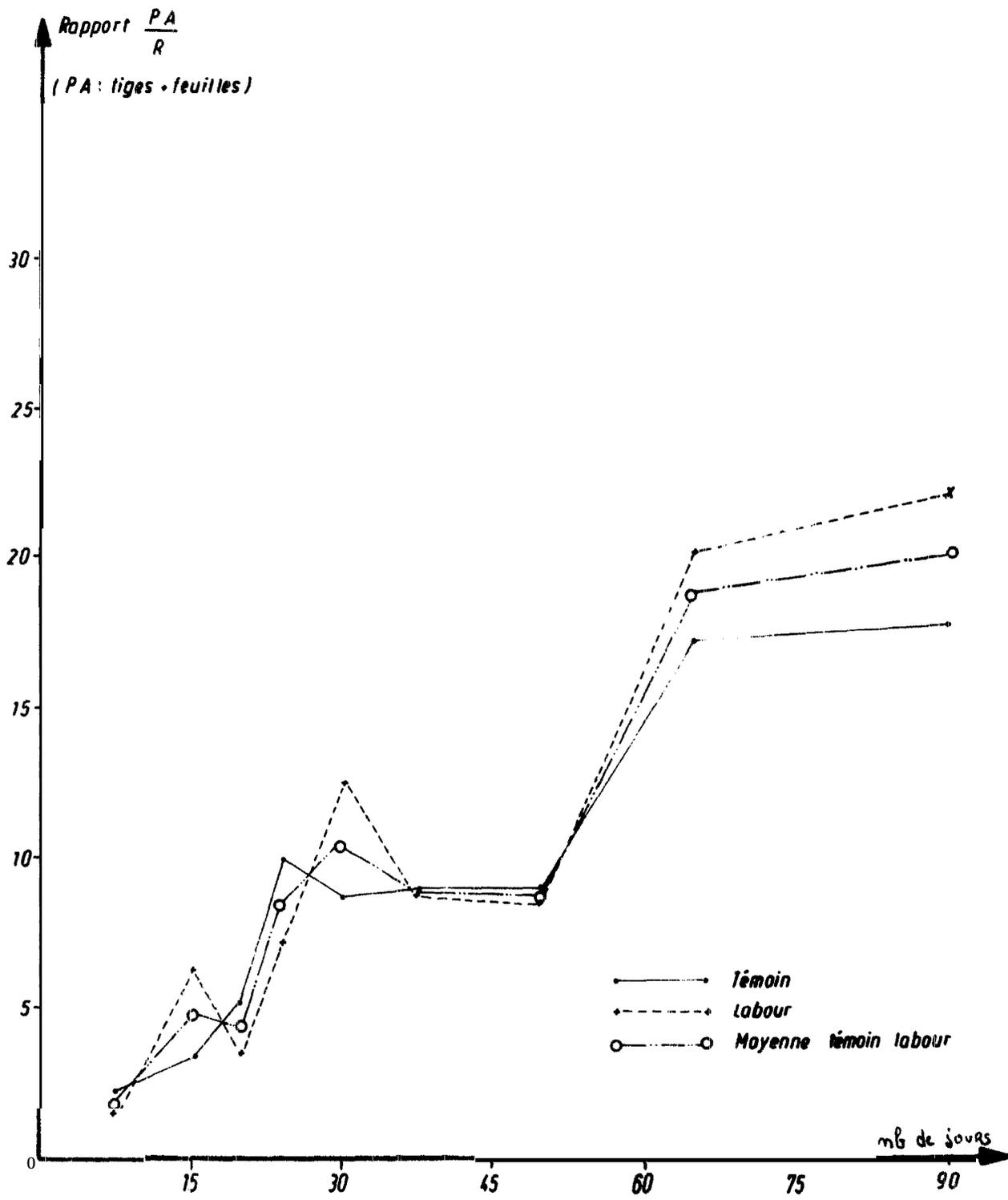


Fig. n° 19 Evolution du rapport poids sec: parties aériennes /racines du mil. Sound

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 du soixantième jour, les profils racinaires sont moins variables. On observe que la plus grande partie de La masse racinaire se trouve dans Les horizons Les plus superficiels (tableau n° 11 et figure n° 21).

Jusqu'à cinquante jours, l'effet du labour se fait sentir sur L'ensemble du système racinaire (tableau n° 12). 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. L'effet moyen du labour sur La masse racinaire diminue fortement vers la fin du cycle de la plante, comme nous l'avons déjà vu.

3.6. * Evolution de La longueur totale des racines au cours du cycle

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 (tableaux annexe n° Y et 10) s'ajuste assez bien entre quinze et vingt jours, à une fonction exponentielle de type $x = x_0 e^{rt}$, avec r représentant La vitesse de croissance relative (CHAMPAGNAT, OZENDA et BAILLAUD, 1969).

$$\begin{aligned} \text{Témo in } L &= 0,287e^{0,161t} \\ n &= 15 \quad r^2 = 0,966 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Labour } L &= 0,515e^{0,159t} \\ n &= 15 \quad r^2 = 0,974 \end{aligned}$$

Si l'on compare les vitesses de croissance relative exprimées en poids de matière sèche (paragraphe 2.4.) et en longueur, on s'aperçoit que, comme pour l'arachide, ces 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, comme nous le verrons plus loin grâce à la caractérisation du diamètre moyen.

Tableau n° 1" : Repartition des racines de mil dans profil le sol en fonction du niveau de profondeur (en mg de racines par dm³ de sol)

Profondeur (cm)	30 jours				50 jours				entre 65 et 90 jours			
	Témoïn		Labour		Témoïn		Labour		Témoïn		Labour	
	Densité racinaire	% du total	Densité racinaire	% du total	Densité racinaire	% du total						
0 - 30	2,7	91	6,1	90	40,8	69	82,8	76,0	78,0	79,0	105,1	82,6
30 - 60	0,25	9	0,68	10	8,6	15	12,0	11,0	9,1	9,2	10,0	7,9
60 - 100					5,4	12	8,4	10,3	6,3	8,5	5,7	6,0
100 - 180					0,8	4	1,1	2,7	1,2	3,2	1,7	3,6

Tableau n° 12 : Effet du labour sur la densité racinaire dans le profil du sol en % des différences Labour - Témoïn

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

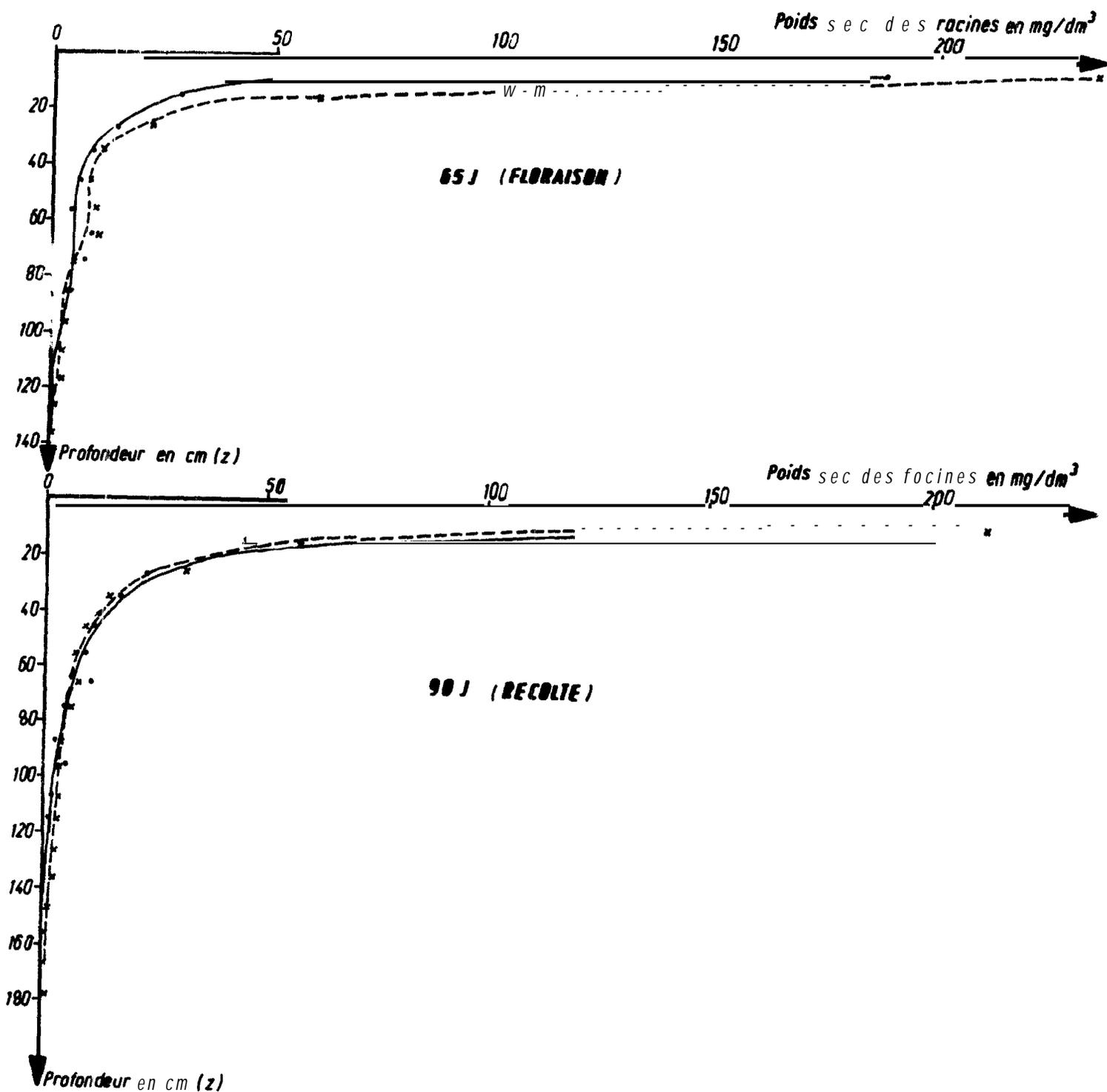


Fig. n° 21 Profils racinaires mil à la floraison et à la récolte
avec et sans labour

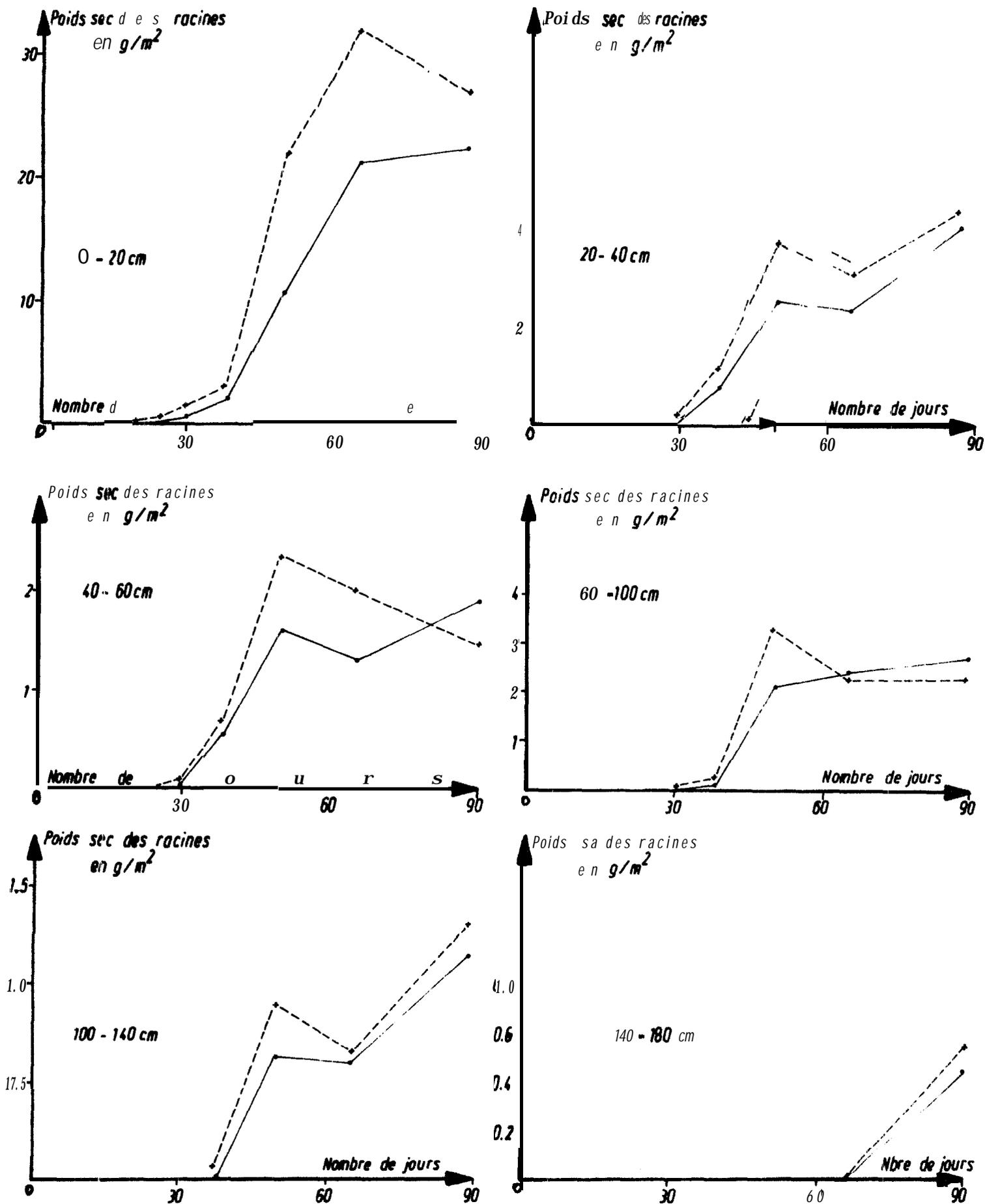


Fig. n° 20 Evolution du poids total des racines de mil Souda dans les différents horizons en g/m² avec 1 poquet de 3 plantes/m²

Entre trente et cinquante jours, on assiste à une phase de croissance très rapide puisque La Longueur totale des racines passe de 50 à 1500 m/m² sur Labour et de 30 à 1000 m/m² sur Le témoin. A partir du cinquantième jour, La Longueur totale des racines continue à augmenter mais moins rapidement, surtout sur Labour. A La récolte, La Longueur totale du système racinaire atteint en moyenne 2750 m/m² sur Le témoin et 3000 m/m² sur Labour (tableau n° 16).

L'effet du Labour sur La longueur de L'enracinement se fait sentir dès Le début du cycle (tableau n° 13), plus tôt que sur le poids de matière sèche ; il semble donc y avoir un effet de la technique sur Le degré de finesse des racines.

Tableau n° 13 : Evolution de La Longueur totale de l'enracinement du mil au cours du cycle en m/m²

Stade de végétation	Témoin	Labour
15 jours début tallage	4	5
20 jours	8	17
24 jours	12	25
30 jours	29	57
50 jours début épiaison	1030	1497
90 jours récolte	2748	3020

La Longueur totale des racines de mil est donc encore très faible jusqu'au trentième jour, nettement plus faible par m² de culture que celle de L'arachide (environ 250 m/m² Le trentième jour).

Toutefois, si L'on ramène Les valeurs à la longueur par pied, celles-ci deviennent comparables (de 15 à 20 mètres par pied le trentième jour, en présence de Labour).

Par contre, en fin de cycle, La Longueur totale des racines par pied, et même par unité de surface cultivée, est nettement supérieure, ce qui traduit une meilleure colonisation du sol par les racines de mil.

Nous allons maintenant examiner comment se répartit cette colonisation dans Le profil.

3.7. - Répartition de La longueur totale et de La distance moyenne entre les racines en fonction de la profondeur

3.7.1. - Longueur totale

Les profils racinaires moyens exprimés en m/dm^3 et par tranches de sol de dix centimètres apparaissent sur la figure n° 22.

En début de cycle, la colonisation se fait surtout dans les 20 premiers centimètres. Aux stades début épiaison et récolte, la Longueur des racines par dm^3 de sol diminue rapidement dans Les quarante premiers centimètres, moins rapidement toutefois que dans le profil racinaire du poids de matière sèche. Entre 40 et 100 cm, Le gradient est plus faible.

Jusqu'à L'épiaison, on observe un effet du Labour sur toute La profondeur de sol. colonisée ; par contre, en fin de cycle, celui-ci ne se fait plus sentir qu'en profondeur.

La Longueur des racines par unité de volume de sol est un meilleur critère pour apprécier la 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 ; c'est pourquoi, Les résultats précédents ont été repris en Les exprimant sous cette forme.

3.7.2. - Distances moyennes entre les racines

L'évolution, dans Le temps, de La distance moyenne entre Les racines à différentes profondeurs pendant la période de végétation du mil, est représentée sur Les figures n° 23 et 24..

Aux stades tallage, épiaison, et récolte nous avons' tracé Le profil de distances moyennes entre les racines. L'évolution est rapide jusqu'à 50 jours. Au trentième jour après Le semis (tallage), la colonisation du sol est encore faible en dessous de 20 cm ; Les distances moyennes entre les racines dépassent rapidement des valeurs de 15 à 20 cm et, même dans l'horizon superficiel 0-10 cm, les distances entre racines sont supérieures à 5 cm.,

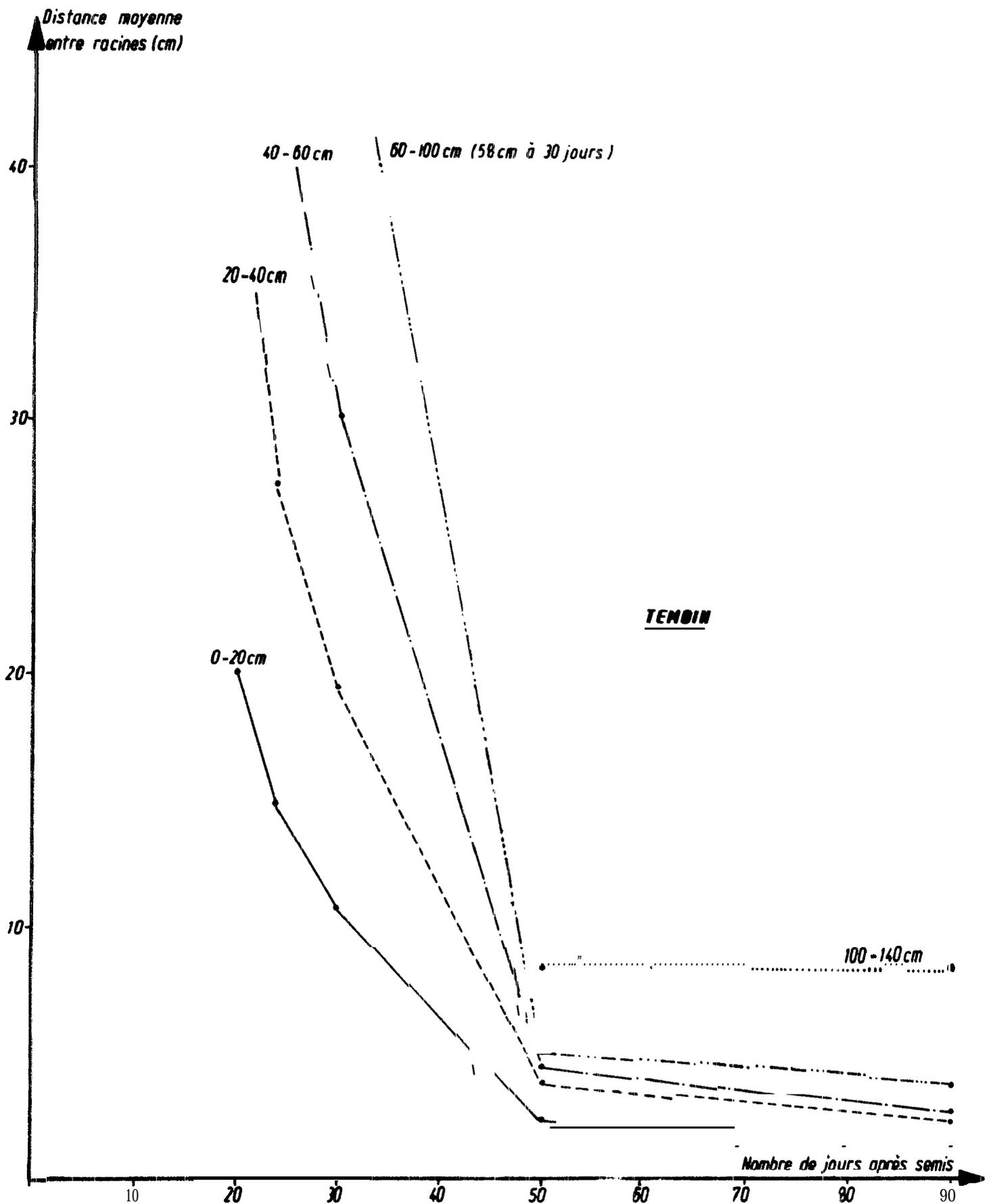


Fig. n° 23 Evolution de la distance moyenne entre les racines de mil en cm par niveau, de profondeur en fonction du stade de végétation (témoin)

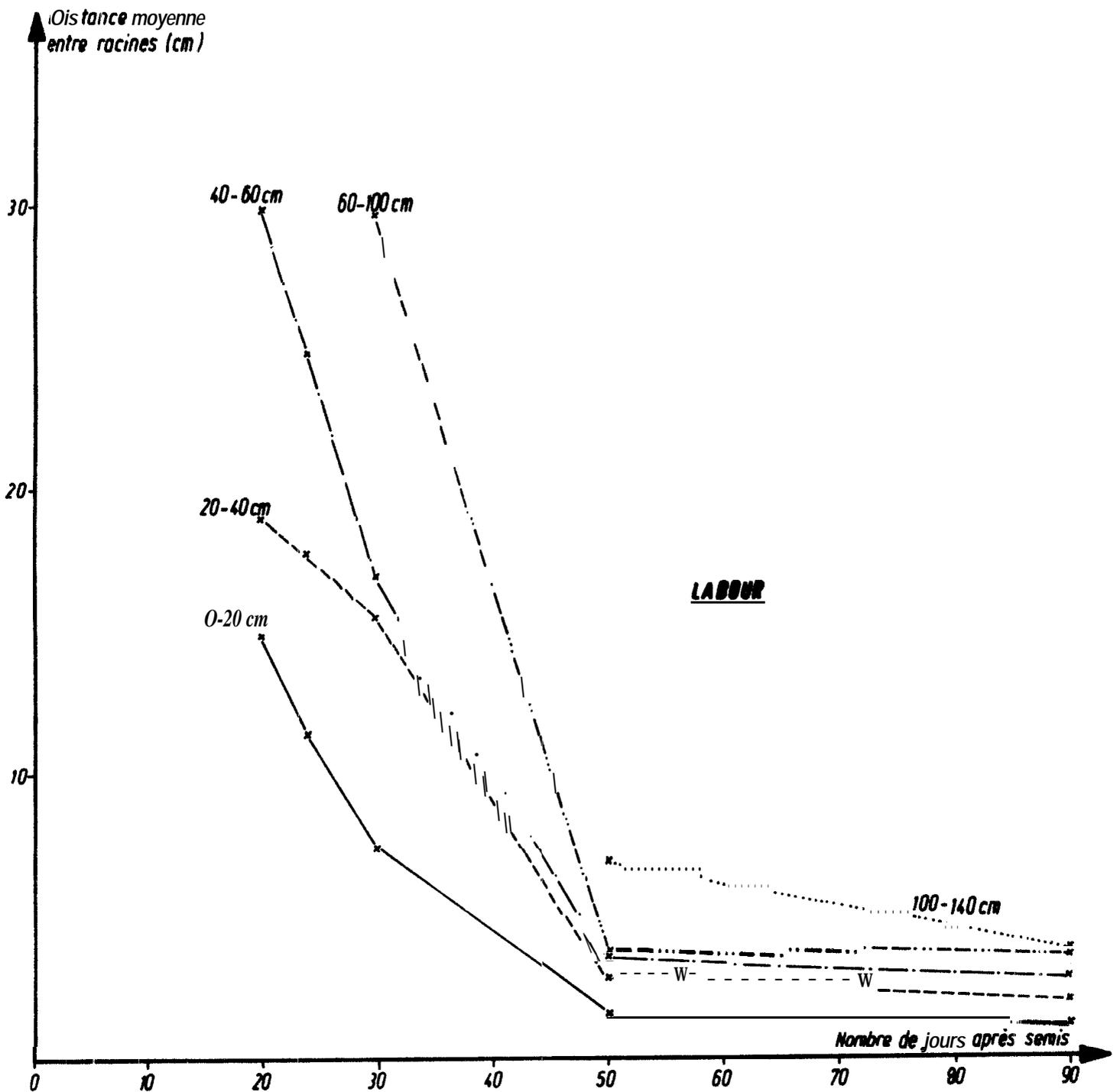


Fig. n° 24 Evolution de la distance moyenne entre les racines de mil par niveau de profondeur en fonction du stade de végétation (labour)

Par contre, au début de l'épiaison, la colonisation du **sol** est bien meilleure dans Le premier mètre. Sur Le témoin, Les distances moyennes entre racines varient seulement de 2 à 6 cm entre 0 et 100 cm de profondeur. Sur Labour, elles restent inférieures à 6 cm jusqu'à 120 cm.

Dès Le cinquantième jour, Le système racinaire du mil colonise donc très bien Le **sol** jusqu'à plus de 100 cm de profondeur, contrairement à ce que pourrait Laisser croire la répartition du poids de matière sèche des racines (figure n° 25) ; 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 apparait 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 de La période où Les besoins en eau sont Les **plus** importants, de L'épiaison jusqu'à La fin floraison (DANCETTE, 1973), et où L'incidence d'un stress hydrique sur Le rendement final est Le plus grave.

Grâce à sa bonne colonisation du **sol** en profondeur, La variété de mil étudiée est donc bien adaptée à des zones où La **pluviométrie** est aléatoire mais où Les **sols** sont profonds.

3.8. • Variation de La densité racinaire en fonction de La distance par rapport au pied

Au stade récolte, comme pour L'arachide, nous avons essayé d'évaluer Le gradient de densité racinaire en fonction de La distance par rapport au pied de mil.

Pour cela, sur un pied de mil semé normalement (1 m x 1 m) et situé dans une parcelle sans pieds manquants, nous avons séparé Les monolithes habituels de 1 x 1 x 0,10 m, en 25 parallélépipèdes prélevés et traités **séparément**.

Les résultats des mesures de poids sec de racines (en g/dm^3) et des distances moyennes entre les racines sont présentés sur les figures n° 26 et 27.

- densité racinaire (exprimée en g/dm^3 de sol)

Dans les horizons de surface,, on note un gradient important du centre de poquet jusqu'à une distance de 30 cm de celui-ci. Par contre,, en dessous de 20 cm de profondeur, la répartition horizontale paraît homogène,

- distance moyenne entre les racines (exprimée en cm)

Le gradient existe toujours à proximité du poquet., mais il est beaucoup moins accentué que celui du poids de matière sèche des racines. La différence entre les deux critères est due à la présence, autour du poquet, d'une couronne constituée d'une grande quantité de racines principales qui partent de celui-ci et dont le poids par unité de longueur est très supérieur à la moyenne.,

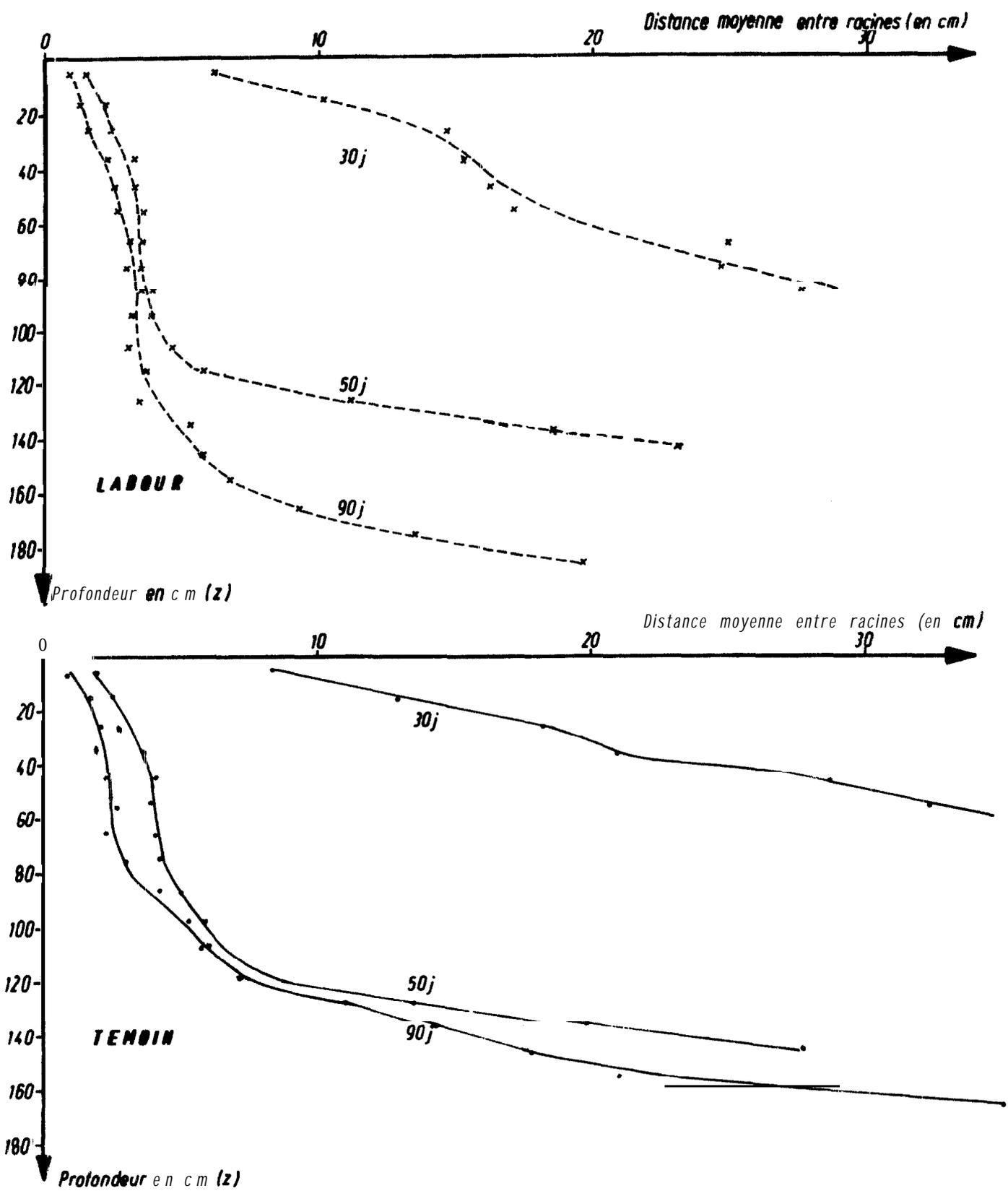
Mais nous avons vu que la distance moyenne entre les racines est un meilleur critère pour apprécier la colonisation du sol par celles-ci. On peut considérer, qu'au delà d'un "bol" situé immédiatement sous le poquet,, la colonisation du sol par les racines est assez régulière pour une même profondeur quelle que soit la distance par rapport au pied.

Lorsque le système racinaire a atteint son plein développement, à la récolte mais aussi dès le stade épiaison d'après ce que nous avons vu précédemment, les possibilités d'utilisation des réserves hydriques et minérales du sol situées au milieu de l'inter ligne paraissent donc presque aussi bonnes que sous le pied.

3.9. - Evolution de la moyenne et de l'écart type de la population des diamètres en fonction de la profondeur et du stade de végétation

Comme dans l'étude de l'enracinement de l'arachide, nous avons calculé les valeurs des diamètres moyens des échantillons de racines prélevées à partir des mesures de la longueur totale et de la surface diamétrale. Nous avons aussi calculé les écarts types des populations de diamètres indirectement à partir du volume, de la longueur totale et du diamètre moyen.

Les résultats figurent dans le tableau n° 14 et la figure n° 28.



**Fig. n° 25 Profils de distances moyennes entre les racines-
de mil à 30, 50 et 90j**

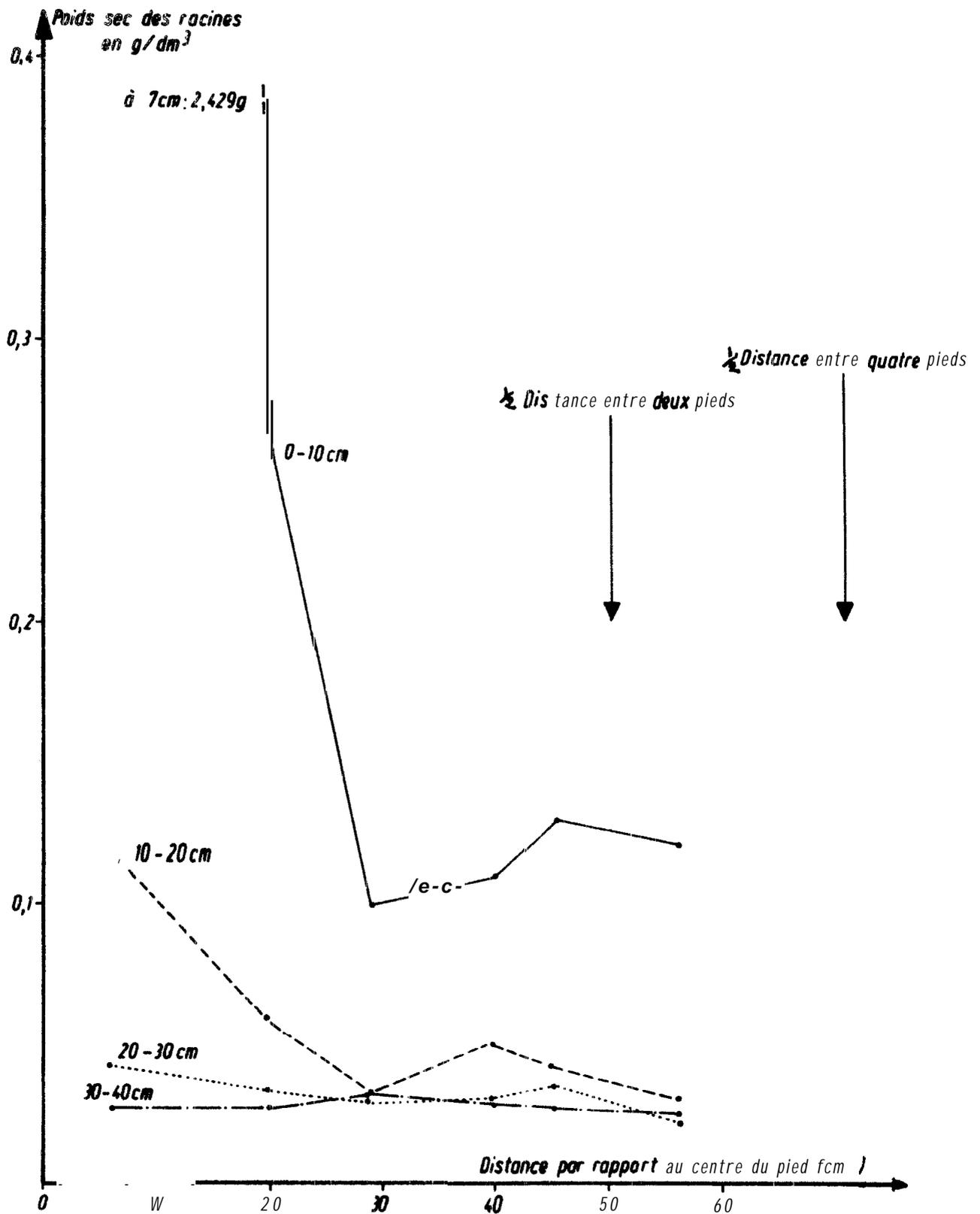


Fig. n° 26 Densité racinaire (g/dm³) du mil en fonction de la profondeur et de la distance par rapport au pied (stade récolte.)

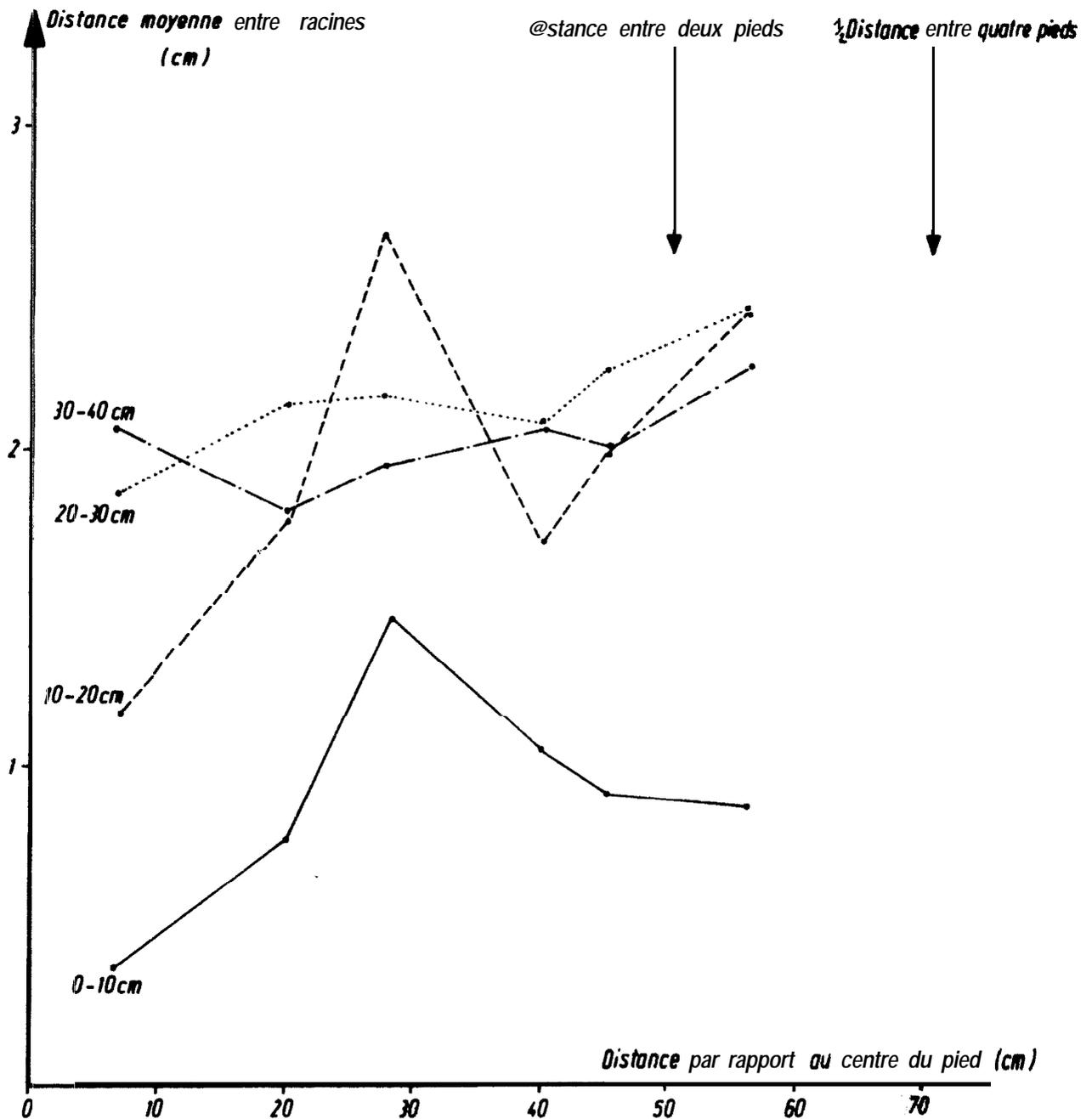


Fig. n° 27 Distances moyennes entre racines de mil en fonction de la profondeur et de la distance par rapport au pied (stade de récolte)

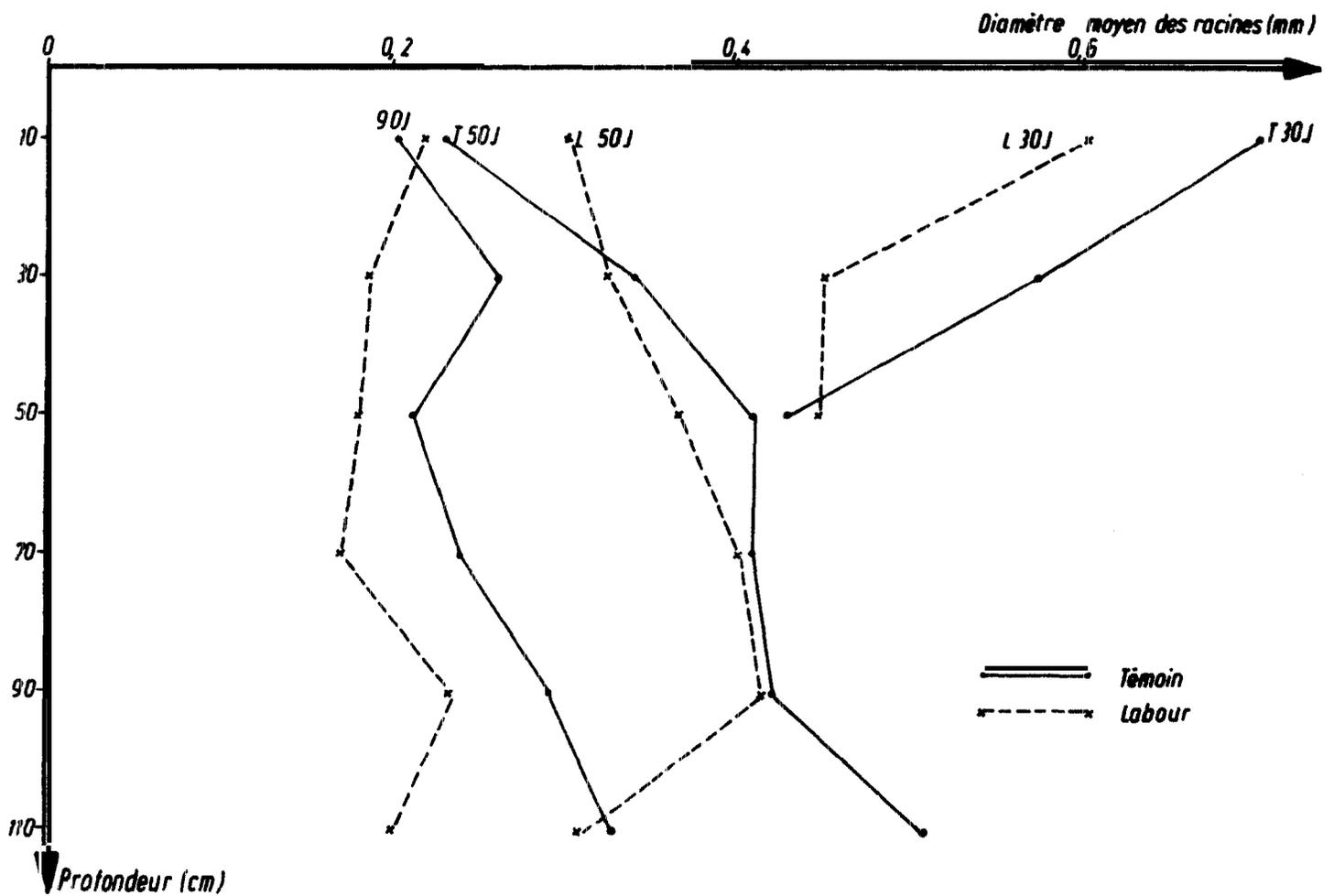


Fig. n° 28 Evolution du diamètre moyen des racines de mil entre 30 et 90j avec et sans labour (en mm)

Tableau n° 14 : Evolution du diamètre moyen des racines de mil (en mm) et de L'écart type de La population des diamètres en fonction du stade de végétation et de La profondeur

Stade de végétation:		30 jours (tallage)				50 jours (début épiaison)				90 jours (récolte)			
Traitement		Témoi n		Labour		Témoi n		Labour		Témoi n		Labour	
Profondeur en cm		!Di amètre!	Ecart	!Di amètre!	Ecart	!Di amètre!	Ecart	!Di amètre!	Ecart	!Di amètre!	Ecart	!Di amètre!	Ecart
		!moyen !	!type !	!moyen !	!type !	!moyen !	!type !	!moyen !	!type !	!moyen !	!type !	!moyen !	!type !
0-20		0,71	0,26	0,61	0,44	0,23	0,30	0,30	0,30	0,21	0,26	0,22	0,34
20 - 40		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
100 - 120										0,33	0,15	0,20	0,20

Afin de faciliter l'évaluation de la dispersion des diamètres, nous avons aussi calculé, à partir des valeurs précédentes, les rapports écart type/diamètre moyen (tableau n° 15).

Tableau n° 15 : Evolution du rapport écart type/moyenne des diamètres des racines de mi en fonction du stade de végétation et de la profondeur.

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	0,83	1,24
130 - 100			0,40	0,48	0,50	0,88
100 - 120					0,45	1,00

En début de cycle, le diamètre moyen des échantillons est assez élevé en surface, mais diminue avec la profondeur ; il passe de 0,65 mm environ de 10 cm, à 0,45 mm à 50 cm, ce qui semble correspondre au défilement des racines principales. A 50 jours, le diamètre moyen à 10 cm de profondeur a une valeur comprise entre 0,20 et 0,30 mm. Les diamètres moyens augmentent ensuite légèrement jusqu'à 50 cm pour atteindre 0,4 mm. En fin de cycle, le diamètre moyen des racines se situe aux environs de 0,2 mm dans le premier mètre. En dessous, du fait du faible développement racinaire, les mesures deviennent peu précises. On assiste donc, comme pour L'arac:hide, à une diminution du diamètre moyen des échantillons de racines prélevées au cours du cycle, ce qui correspond à une augmentation de la proportion de racines fines. Pour un même stade, il semble que le Labour ait pour effet de diminuer légèrement le diamètre moyen de l'enracinement, mais les différences sont très faibles.

Au tallage (30 jours), l'écart type des diamètres est nettement inférieur à la valeur du diamètre moyen. Entre 40 et 60 cm de profondeur, il est même très faible. A l'épiaison, l'écart type des diamètres diminue avec la profondeur, alors que la valeur du diamètre moyen augmente, ce qui montre, qu'à ce stade, l'enracinement n'est bien ramifié que dans les horizons de surface (entre 0 et 40 cm de profondeur). A la récolte, Les écarts types calculés sont comparables à ceux obtenus à l'épiaison. Comme le diamètre est plus faible en profondeur à partir de 40 cm, cela indique que le degré de ramification des racines situées en profondeur a augmenté entre l'épiaison et la récolte.

L'effet du Labour sur le degré de ramification est surtout marqué en début de cycle (jusqu'à 30 jours) ; ensuite il est plus faible et plus irrégulier.

Il se confirme donc, 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 de faire baisser la valeur des diamètres moyens des échantillons de racines et d'augmenter la dispersion de ces diamètres. Cette ramification paraît se faire d'abord à partir de la surface, mais à la récolte, concerne l'ensemble du profil dans le premier mètre.

Les différentes mesures réalisées à plusieurs stades de végétation permettent de conclure que, comme pour l'arachide, l'évolution du poids sec total ou de la longueur suit une courbe classique en S.

Entre la germination et le début de tallage (15 jours), c'est le système séminal qui domine ; celui-ci reste peu profond. A partir du quinzième jour et jusque vers le trentième jour c'est à dire pendant la plus grande partie de la phase de tallage, on assiste à l'émission et à l'élongation de nombreuses racines adventives ; le front racinaire progresse rapidement (3,5 cm/jour), mais ces racines de diamètre important (de l'ordre du millimètre) restent très peu ramifiées, la longueur totale reste faible : elle est d'environ 50 m par

poquet le trentième jour. Du quinzième au trentième jour, l'augmentation de la longueur totale est donc en moyenne d'un peu plus de 3 m par jour,

Entre la fin du tallage (30 jours) et le début de l'épiaison (50 jours), le front racinaire continue de progresser mais un peu moins vite. Par contre, à partir des racines principales, on assiste à l'émission de très nombreuses racines fines, ce qui est bien caractérisé par la diminution de la valeur moyenne et par l'augmentation de l'écart type des populations des racines prélevées. Le nombre des apex racinaires augmente donc fortement, ce qui entraîne une augmentation extrêmement rapide de la longueur totale, qui, en présence de labour, croît de plus de 70 m/jour en moyenne, pour atteindre 1500 m par poquet: Cou par m²) au début de l'épiaison. A ce stade, Le profil de sol. est bien colonisé dans le premier mètre où les distances moyennes entre racines sont partout inférieures à 6 cm.

Ensuite, à partir du début floraison (55-60 jours), l'évolution du système racinaire est nettement ralentie. Le front racinaire continue de progresser mais plus lentement, et la profondeur maximale de l'enracinement atteint en moyenne 180 cm en fin de cycle. L'augmentation de la colonisation du sol se fait surtout en dessous de 120 cm.

Pendant les quinze à vingt premiers jours du cycle, l'enracinement du mil. reste superficiel ; il est nettement moins profond que celui de l'arachide, mais le nombre de plantes par surface cultivée et la production de matière sèche des parties aériennes est aussi beaucoup moins forte.

Lorsque les besoins en eau du mil deviennent importants à partir de la fin de la montaison, l'enracinement prospecte très bien le profil de sol sur plus d'un mètre où, compte tenu des faibles distances entre les racines,, il doit pouvoir utiliser presque entièrement les réserves hydriques dites utiles (situées au-dessus de point de flétrissement permanent).

IV. - DEVELOPPEMENT DU SYSTEME RACINAIRE DU SORGHO AVEC ET SANS TRAVAIL DU SOL

Le sorgho est une autre graminée céréalière dont la morphologie est très proche de celle du mil. La taille est plus ou moins grande suivant les variétés. Nous avons étudié ici une variété demi-naine améliorée (63-18) de

180 cm de haut, donc de taille légèrement inférieure au mil, et une variété de haute taille 4 mètres (variété congossane) dont Le cycle est nettement plus long (140 jours). Le mode de culture est comparable à celui du mil, avec un semis en poquets suivi d'un démariage.

L'espacement entre les poquets est de 1 x 1 m, comme pour Le mil, ce qui facilitera les comparaisons. Toutefois, Le sorgho a été cultivé sur un sol un peu plus argileux, qui correspond mieux à celui de sa zone de culture habituel Le.

Nous rappelons que Le système racinaire du sorgho, comme celui du riz pluvial, a été étudié lorsque nous ne disposions pas des techniques de mesures de la longueur et du diamètre des racines. L'enracinement a donc été caractérisé à partir du nombre de racines principales et du poids de matière sèche des racines.

4.1. - Germination et début de cycle

Les caractéristiques de La croissance du sorgho en début de cycle se rapprochent beaucoup de celles du mil. Lorsque les conditions d'humidité sont favorables, la racine séminale apparaît 24 heures après le début de la germination. Elle a un diamètre moyen de 1 mm environ, et sa croissance est assez rapide, avec un géotropisme positif prononcé. Au bout de 48 heures, la radicule a 2 à 3 cm ; elle est déjà pourvue de poils absorbants.

Soixante heures environ après le début de la germination, La plantule sort de terre. Après 3 à 4 jours, La première feuille végétative commence à se développer, tandis que des radicelles apparaissent sur la racine séminale qui mesure 5 à 6 cm ; elle a généralement une direction verticale si les conditions physiques du sol sont favorables.

Au stade deux feuilles végétatives (6 jours), la racine séminale mesure une dizaine de centimètres et possède toujours un diamètre d'environ 1 mm. Dans sa partie basale, elle commence déjà à prendre une couleur brun rougeâtre (pigments anthocyaniques). La racine séminale est pourvue de ramifications uniquement dans sa partie basale ; celles-ci font au maximum 2 à 3 cm.

Les premiers prélèvements de plantes ont eu lieu à ce stade., On n'observe aucune différence pondérale entre Les deux traitements témoin et Labour, sur les racines comme sur les parties aériennes. La plante dépend encore principalement des réserves de la graine qui ne sont pas complètement épuisées. Par contre, il existe une différence significative en ce qui concerne la Longueur moyenne de la racine séminale (tableau n° 15).

Tableau n° 15 : Caractéristiques des racines et des parties aériennes de sorgho 63-18 au stade Levée,

	Témoin	Labour
Poids sec des parties aériennes en mg/plante	10 ^a (1)	9 ^a
Poids sec des racines en gm/plante	6 ^a	6 ^a
Hauteur des parties aériennes en cm	6,7 ^a	8,2 ^a
Longueur de la racine séminale en cm	6,9 ^a	9,6 ^b

(1) Les chiffres surmontés d'une même Lettre ne sont pas significativement différents entre témoin et labour au seuil de 0,05 (test t).

La première racine adventive apparaît au niveau du collet, juste en dessous de la surface du sol, Lorsque La plante est au stade trois feui L les, c'est à dire dix jours environ après Le début de La germination.

Au douzième jour, La graine est complètement vidée, Les premières racines adventives (2 à 6) ont une croissance rapide, elles peuvent atteindre 10 cm de Long. Ces racines prennent au départ une direction presque horizontale; puis, lorsqu'elles ont quelques centimètres, une direction oblique. Elles ne possèdent pas ou très peu de racines secondaires mais sont par contre abondamment pourvues de poils absorbants.

Au stade tallage (30 jours) , L'enracinement est encore très peu développé ; La plante est en pleine phase d'initiation de nombreuses racines à partir des premiers noeuds de chacune des talles. Le système racinaire séminal ne représente plus qu'un très faible pourcentage de L'enracinement total, il est de plus en plus difficile à reconnaître.

4.2. - Evolution du nombre de racines adventives primaires par poquet et par talle

4.2.1. - variété 63-18

L'émission des racines adventives au cours du cycle a une allure générale de courbe en S (figure n° 29) comme les courbes de croissance. Toutefois, entre le trentième et le soixante quinzième jour, l'évolution dans le temps du nombre total de racines adventives primaires par plante peut s'ajuster à une fonction du premier degré :

$$\begin{aligned} \text{Témoins } N &= 3,74t - 77,5 \\ n &= 12 \quad r = 0,948 \\ \\ \text{Labour } N &= 6,17t - 140,6 \\ n &= 12 \quad r = 0,970 \end{aligned}$$

La comparaison des coefficients de régression de ces deux droites met bien en évidence l'effet du labour sur le rythme d'émission des racines.

Si l'on considère le nombre de racines primaires par talles (tableau n° 16), on observe une augmentation entre les stades de tallage et d'épiaison puis une stabilisation. Le labour a un effet assez marqué au début de cycle, puis celui-ci devient négligeable.

Tableau n° 16 : Evolution du nombre de racines par talle du sorgho (variété 63-18)

	Tallage 32j	Montaison 50j	Epiaison 75j	Récolte 110 j
Témoins	7	21	36	40
Labour	13	22	41	40

4.2.2. - Variété congossane

On dispose de résultats, uniquement en fin de cycle, au stade grains laitoux et sur sol labouré (tableau annexe n° 24).

A ce stade, le nombre total de racines par pied est de 262, donc inférieur à celui de la variété 63-18 ; mais, du fait d'un tallage moins important, le nombre de racines par talle (57) est plus grand que celui de la variété 63-18

4.3. - Evolution du front racinaire au cours du cycle

4.3.1. - Variété 63-18

La progression du front racinaire est régulière et continue jusqu'à la fin du cycle ; elle n'est pas tout à fait Linéaire (figure n° 30) et peut s'ajuster à une courbe du second degré ($y = ax^2 + bx + c$) en fonction du temps (t nombre de jours après Le semis) , dont la courbure (a) est cependant très faible :

$$\text{Témoïn} \quad Z = 0,005t^2 + 1,422t - 2,397$$

$$n = 6 \quad r^2 = 0,990 \quad F = 147$$

$$\text{Labour} \quad Z = 0,006t^2 + 1,689t - 1,155$$

$$n = 6 \quad r^2 = 0,963 \quad F = 39$$

On remarque que la vitesse de progression au départ (b), est légèrement plus grande en présence de labour,, En fin de cycle, le front atteint seulement 110 cm de profondeur sur labour et 90 cm sur témoin.

4.3.2. - Variété congossane

Au stade grains laitoux (120 jours) et sur labour, la profondeur maxirnale des racines est de 130 cm (tableau annexe n° 25). Le système racinaire de cette variété parait donc légèrement plus profond que celui de la variété 63-18 mais les vitesses de progression sont cependant très proches : 110 cm à 110 jours pour la variété 63-18, et 130 cm à 120 jours pour la variété congossane.

Sur les deux variétés étudiées, L'enracinement est nettement moins profond que celui du mi 1.

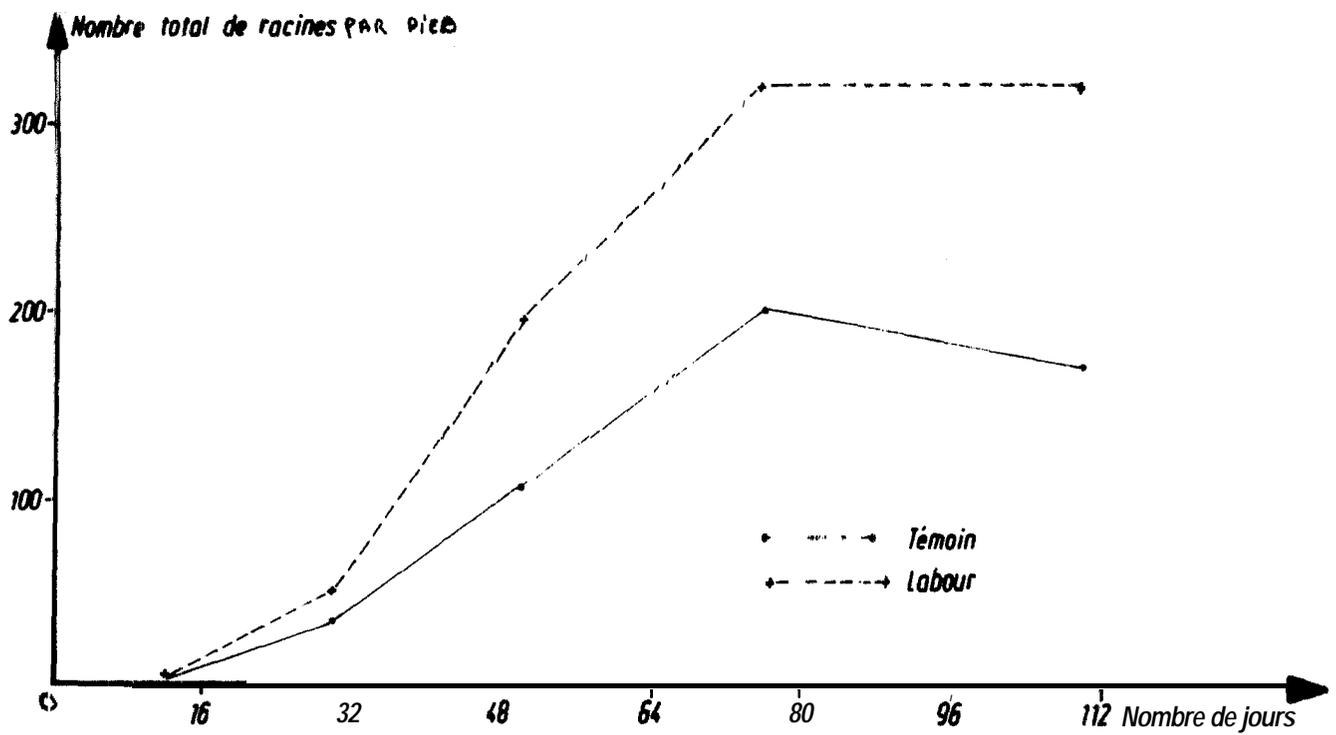


Fig. 29 Evolution du nombre de racines par pied du Sorgho 6318

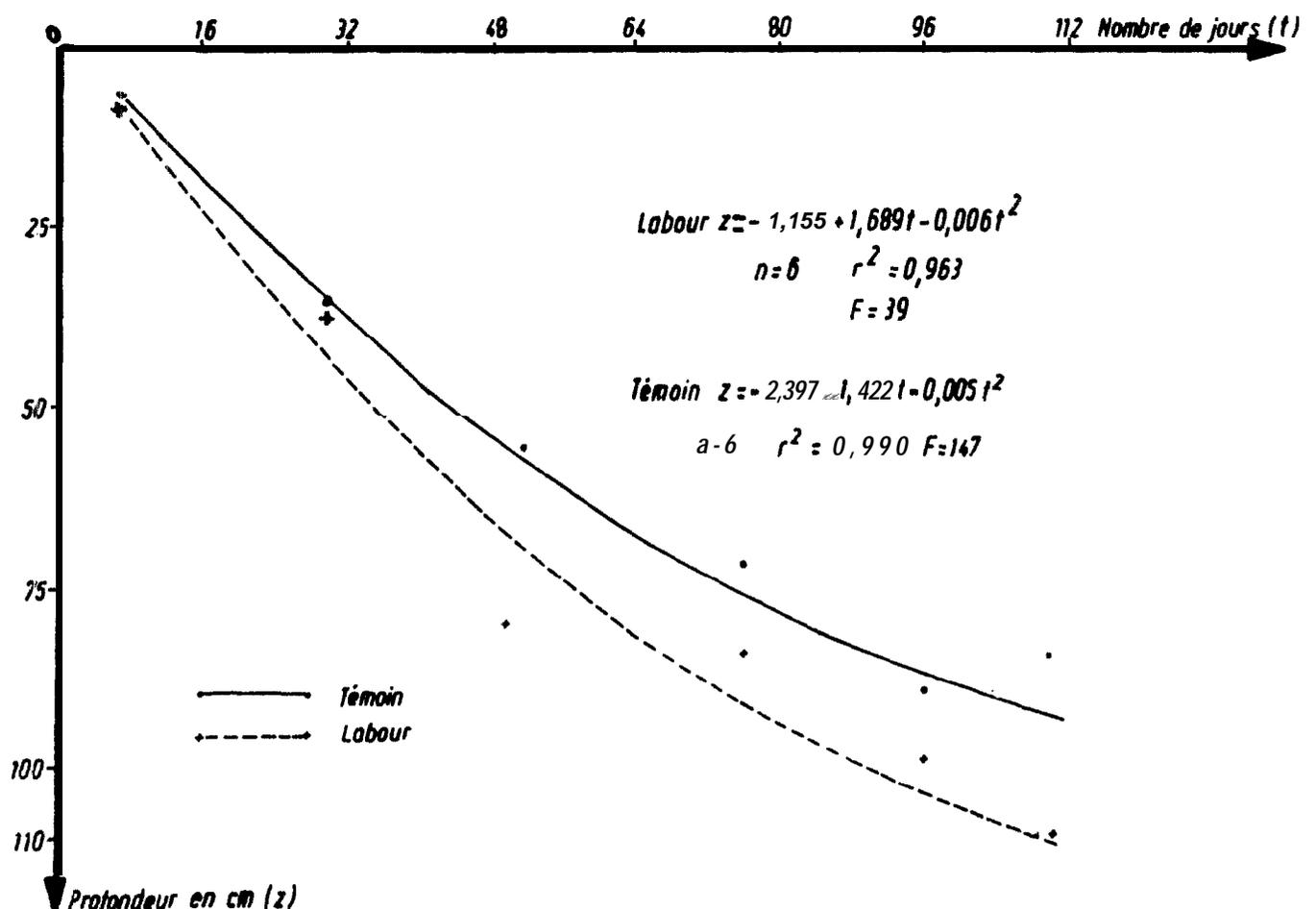


Fig. n° 30 Evolution du front racinaire du Sorgho 6318

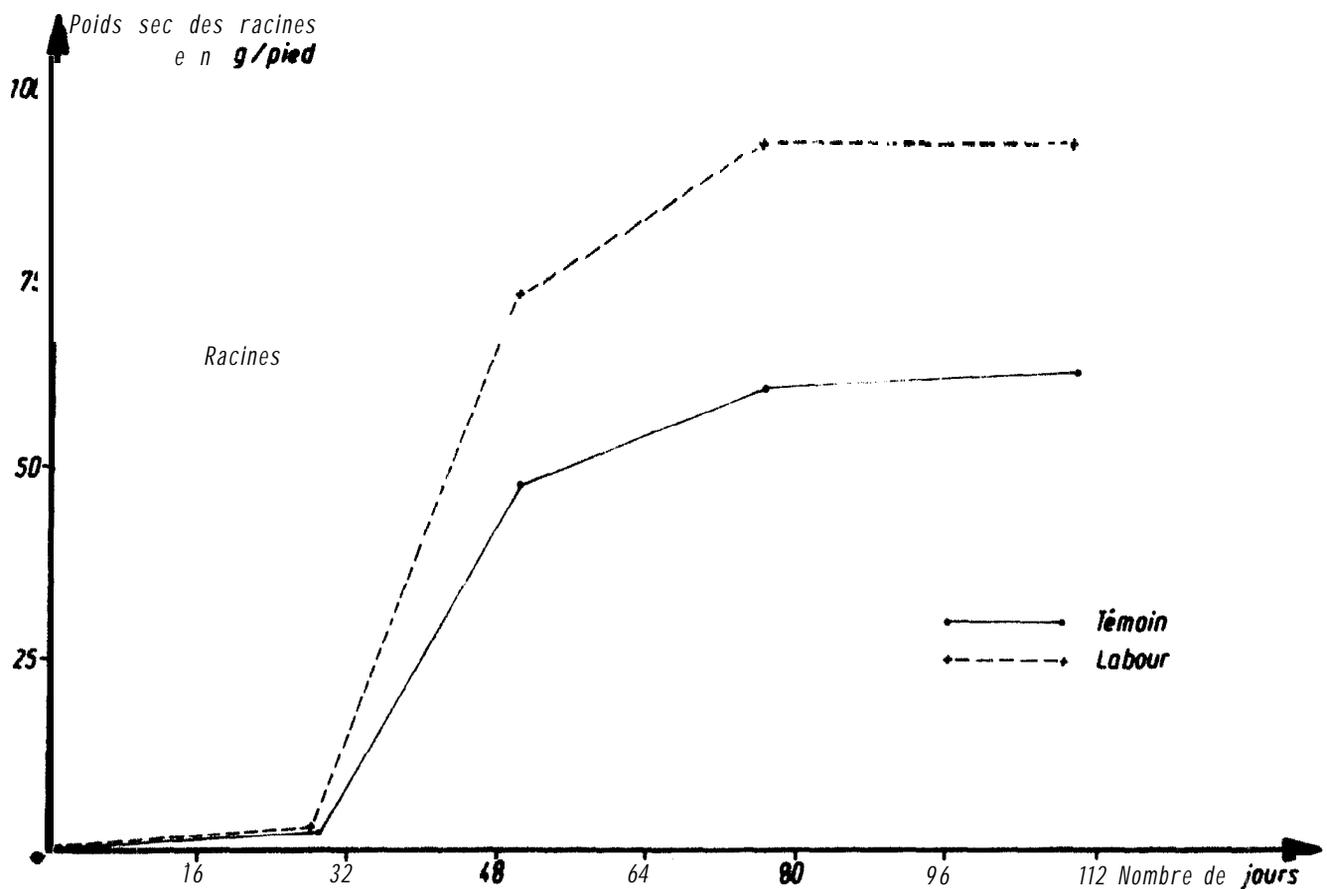
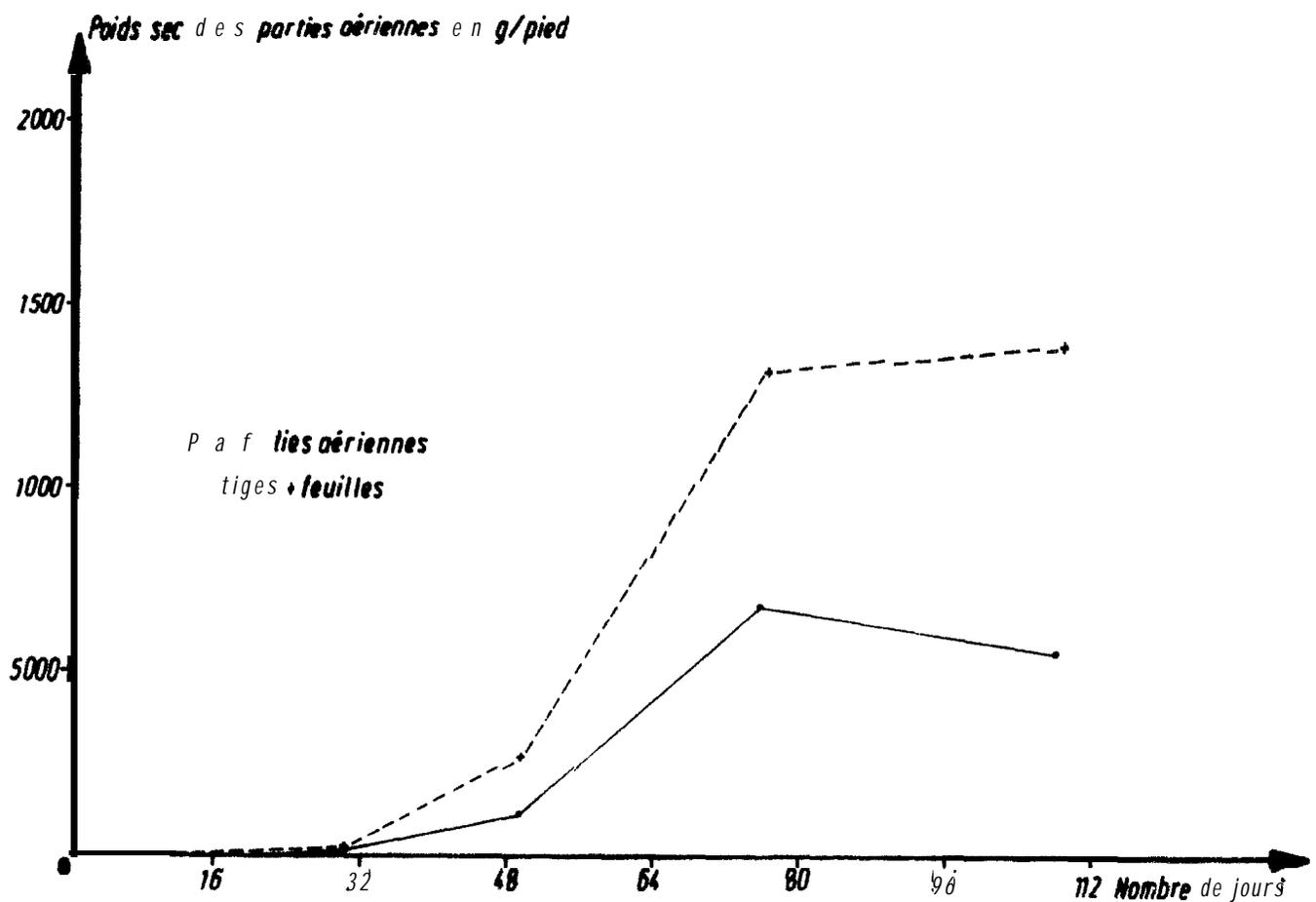


Fig. n° 3.1 Evolution du poids sec des racines et des parties aériennes des pieds prélevés (en g/pied) du sorgho 63-18

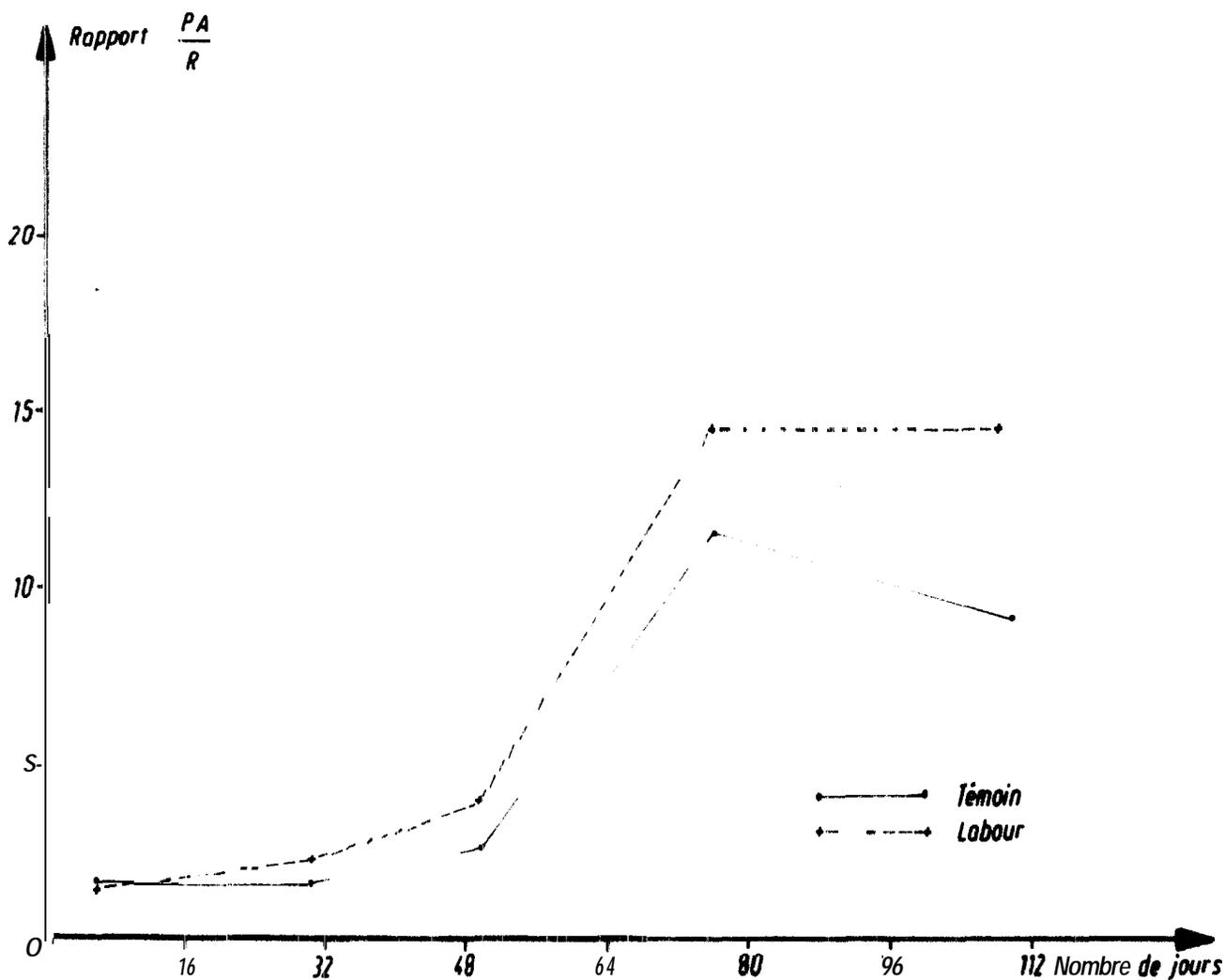


Fig. n° 32 Evolution du rapport poids sec parties aériennes/ racines dl u Sorgho 6318 (à la récolte ; avec et sans épis.)

4.4. - Evolution du poids de matière sèche des racines et du-rapport poids parties aériennes/racines

4.4.1. - Variété 63-18

L'évolution du poids de matière sèche des racines de sorgho est représentée dans le tableau annexe n° 22 et la figure n° 31. En début de cycle et jusqu'au trentième jour, L'enracinement du sorgho est très peu développé ; puis, on assiste à une phase de croissance très rapide jusqu'au cinquantième jour (**montaison**). Le poids total de matière sèche des racines continue ensuite à augmenter entre Le cinquantième et Le soixante quinzième jour, mais à un rythme moins rapide. On observe des différences importantes entre les résultats obtenus sur labour et ceux obtenus sur le témoin. Si l'on excepte la période de Levée, pendant Laquelle il n'y a pas de différence, le Labour augmente le poids total des racines de 50 à 60 % par rapport au témoin, à chacun des stades de végétation. Sur le témoin, Le maximum de poids total de racines obtenu est de 63 g/m^2 , tandis que sur Labour il atteint 94 g/m^2 .

Le rapport entre poids sec des parties aériennes et celui des racines (PA/R) augmente faiblement jusqu'au cinquantième jour. Au stade **mon-taison**, La valeur du rapport PA/R est de 2,5 sur Le témoin et de 4 avec labour, puis, il augmente fortement entre Le cinquantième jour et le soixante quinzième jour (**épiaison**) ; Lorsque L'enracinement a terminé sa phase de croissance rapide, il atteint une valeur comprise entre 12 et 15 (figure n° 32). En fin de cycle, il se stabilise, ou même régresse légèrement, si l'on ne tient compte que des tiges et des feuilles. Si l'on ajoute Le poids des épis, le rapport augmente jusqu'à la récolte.

Le rapport PA/R paraît légèrement plus élevé sur le traitement Labouré, ce qui traduit un effet du labour plus important sur La masse des parties aériennes que sur celle des racines, surtout vers la fin du cycle.

Dans d'autres conditions, en culture sur sable et en serre, ABDELLATIF, NOUR et WEIBEL (1978) trouvent un rapport PA/R de 2 pour des plantes âgées de trois semaines. De Leur côté, en aquiculture, JORDAN, MILLER et MORRIS (1976) ont obtenu des valeurs de 2 à 4 pour des plantes âgées de 60 à 75 jours avec des racines primaires dont La plus grande longueur est de 70 à 90 cm ; enfin, pour des plantes au stade 15 feuilles (3 mois), un rapport PA/R de 4 environ, est enregistré par BUR, MORARD et BERDUCOU (1977).

Ces quelques chiffres s'accordent finalement assez bien avec ceux que nous avons obtenus entre la Levée et Le cinquantième jour, si L'on considère qu'il s'agit des **variétés** dont Le cycle est plus Long que celui des **variétés** Locales.

4.4.2. - Variété congossane

En fin de cycle, Le poids total. des racines de La variété congossane qui est de 122 g/m² (tableau annexe n° 16), est légèrement supérieur à celui de La variété 63-18. Comme Le poids sec des tiges + feuilles est plus faible sur La variété à hautes tiges, du fait d'un **tallage** deux fois moins important, Le rapport PA/R de **10,3** est nettement inférieur à celui de La variété 63-18 (**14,7** à La récolte).

L'enracinement de La variété à hautes tiges de format traditionnel paraît donc être mieux développé que celui de La variété **améliorée**. Nous allons maintenant examiner comment se répartit La masse des racines dans Le profil de sol.

4.5. - Répartition du poids sec des racines en fonction de La profondeur

La répartition du poids sec des racines en fonction de La profondeur a été étudiée au stade grain Laitéux. Elle est représentée sur La figure n° 33 et dans Le tableau n° 17.

Tableau n° 17 : Répartition des racines de sorgho dans Le profil de sol en fonction du niveau de profondeur (en mg de racines par dm³ de sol) au stade grain Laitéux : 90 jours après semis pour **63-18** -- 120 jours pour congossane

Profondeur (cm)	Variété 63-18				Variété congossane	
	Témo in		Labour		Labour	
	Densité racinaire	% du total	Densité racinaire	% du total	Densité racinaire	% du total
0-30	163,5	90,4	210,2	90,6	317	87,3
30 - 60	15,0	8,3	16,7	7,2	30,2	8,3
60 - 100	1,7	1,3	3,8	2,2	10,3	3,8
100 - 130					2,2	0,6

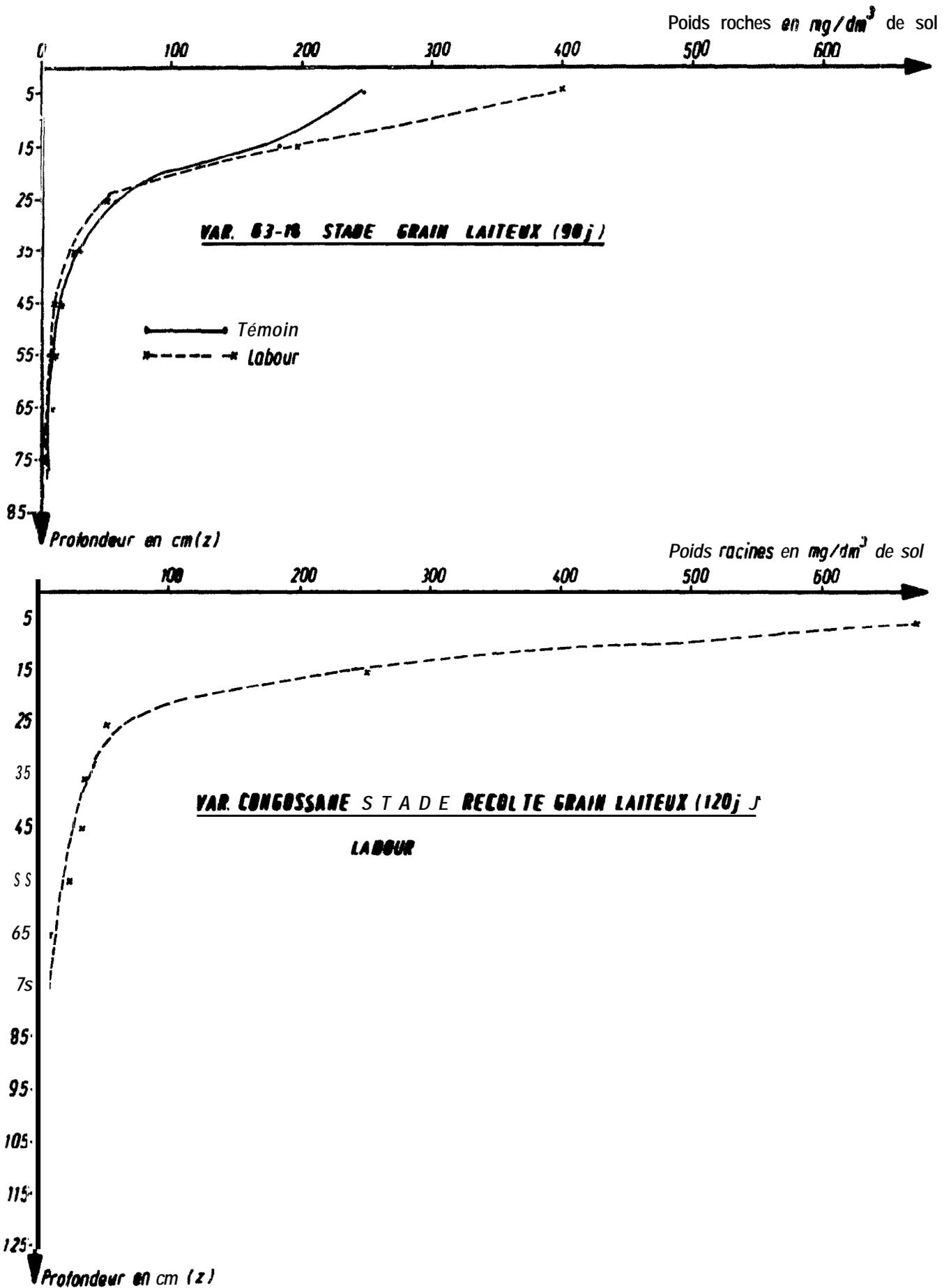


Fig. n° 33 Profils racinaires sorgho (var. 63-18 et congossane) en fin de cycle (en mg de racines par dm³ de sol)

Tableau n° 18 : Effet du labour sur la densité racinaire dans le profil de sol de La variété 63-18 au stade grain Laiteux (en % des différences Labour-témoin)

Profondeur (cm)	Effet du Labour en %
0-30	+ 28,6
30 - 60	+ 11,3
60-100	+123,5

Comme pour les autres espèces étudiées, La plus grande partie de la matière sèche des racines de sorgho est localisée dans les trente premiers centimètres. Le Labour a pour effet d'améliorer nettement La densité racinaire (mg/dm^3) dans l'horizon de surface et en profondeur en dessous de 50 cm (tableau n° 18). La comparaison des deux variétés fait ressortir que, non seulement La profondeur de L'enracinement est supérieure chez La variété congossane, mais Le poids de matière sèche en dessous de 60 cm est aussi très nettement amélioré. Si La morphologie des racines est comparable sur les deux variétés, comme cela semble être le cas d'après des observations réalisées sur Les échantillons de racines prélevées, cette augmentation doit correspondre à une bien meilleure colonisation du sol chez La variété congossane, sur l'ensemble du profil, mais particulièrement en profondeur. Cette variété de format plus traditionnel paraît donc, à un même stade de végétation, mieux adaptée à l'utilisation des réserves hydriques et minérales des couches profondes du SOL, que la variété 63-18, sélectionnée pour sa meilleure productivité, son cycle plus court et sa taille plus réduite.

Les différents résultats obtenus permettent de conclure que l'évolution du poids total de matière sèche des racines de sorgho (variété 63-18) suit une courbe en S, comme pour les autres espèces étudiées précédemment, tandis que La progression du front racinaire se prolonge jusqu'à La récolte à une vitesse presque constante. En début de cycle, il y a surtout une émission de racines principales adventives qui restent peu ramifiées. Puis, vers La fin du tallage et La montaison, L'émission des racines à partir du plateau de tallage

et l'évolution du front racinaire vers la profondeur se poursuivent, mais on assiste surtout à une augmentation spectaculaire de la masse totale des racines. Le poids sec total des racines passe ainsi, en 20 jours, de 2,5 à presque 75 g par plante sur sol labouré. Ceci correspond à une ramification intense des axes principaux.

Entre la montaison et l'épiaison, l'évolution du poids total des racines est devenue plus lente. Après la floraison, le nombre de racines adventives primaires et le poids sec total des racines se stabilisent (100 g environ de poids sec de racines par plante sur sol labouré) ; seul, le front racinaire continue de progresser pour atteindre, à la récolte, la profondeur maximale de 110 cm.

Au stade grains laitoux (120 jours), la variété congossane de cycle plus long a, par rapport à la variété 63-18 au stade récolte (110 jours), un nombre de racines par talle et une profondeur d'enracinement supérieurs. D'autre part, le poids sec total des racines est plus important pour une production de matière sèche des parties aériennes inférieure, avec en particulier plus de racines en profondeur si l'on compare les deux variétés au stade grains laitoux.

La variété congossane paraît donc posséder un système racinaire mieux développé et mieux apte à utiliser les réserves hydriques et minérales du sol que la variété améliorée 63-18. Nos résultats ne permettent cependant pas de conclure définitivement sur ce point. Une caractérisation plus fine des systèmes racinaires, à plusieurs stades de végétation, serait nécessaire pour comparer valablement ces deux variétés de cycle différent.

Par contre, il apparaît que le labour améliore nettement chacune des caractéristiques étudiées du système racinaire du sorgho.

V. DEVELOPPEMENT DU SYSTEME RACINAIRE DU RIZ PLUVIAL AVEC ET SANS TRAVAIL DU SOL

Le riz pluvial est une céréale dont la morphologie des parties aériennes est très différente de celles du mil. et du sorgho étudiées précédemment, en particulier la taille, ce qui entraîne une densité de semis plus importante.

Le riz pluvial se définit comme un riz cultivé sur un sol exondé et dont les besoins en eau sont couverts uniquement par les pluies, par opposition au riz aquatique cultivé dans un sol surmonté d'une lame d'eau plus ou moins permanente. Les variétés qui correspondent à ces deux types de culture sont en général très différentes. Seul le système racinaire du riz pluvial sera étudié ici. Toutefois, même entre les variétés de riz pluvial cultivées dans des conditions identiques, il peut exister des différences marquées (NICOU, SEGUY et HADDAD, 1970). C'est pourquoi, nous avons suivi le développement des systèmes racinaires de trois variétés sélectionnées, choisies parmi les mieux adaptées au milieu dans lequel elles ont été cultivées ; il s'agit des variétés I KONG PAO, 63-83 et IGUAPE CATETO. Le semis a été réalisé en poquets espacés de 30 cm les uns des autres et démarriés à un pied : la densité de population est donc de onze plantes par m². Le nombre de racines adventives primaires et le poids de matière sèche obtenus seront donnés en valeurs par plante pour faciliter la comparaison avec les autres céréales étudiées précédemment.

Nous présenterons d'abord les résultats de la variété I K P, d'origine asiatique, à pailles courtes (80 cm) et à cycle de 110 jours, puis nous les comparerons à ceux des variétés 63-83 et IGUAPE CATETO dont plusieurs caractéristiques sont identiques, en particulier le cycle (120 jours) et la hauteur des pailles (120 cm).

5.1. - Germination et début de cycle

La germination dure environ trois jours. Le système racinaire issu de la graine comprend trois racines : la racine séminale proprement dite qui apparaît d'abord, puis deux racines au niveau du noeud scutellaire (ROY, 1967). Dès les quatre ou cinq premiers jours qui suivent la levée, des racines adventives apparaissent sur les premiers noeuds de la plantule.

Le système séminale se ramifie très vite ; par contre, les racines adventives restent dépourvues de radicelles pendant plusieurs jours. Par la suite, un fin chevelu racinaire va se développer, la quantité dépendra des variétés et des caractéristiques physiques du sol, mais, en général, elle sera abondante.

En début de cycle, la vitesse de croissance du système séminal est faible, de l'ordre de 1 cm/jour ; Les racines sont blanches, ce caractère se maintiendra tout au long du cycle.

Au moment de la levée, il n'y a pas de différences facilement discernables entre les enracinements des trois variétés étudiées, ni d'effet marqué du labour.

5.2. - Evolution du nombre total de racines adventives primaires par pied et par talle au cours du cycle de la plante.

5.2.1. - Variété 1 KONG PAQ

En présence de labour (figure n° 34, tableau n° 19) et dans les conditions de culture étudiées (semis en paquets et démariage à une plante/poquet), le nombre de racines émises entre le quinzième et le Soixante-cinquième jour, soit du début du tallage à la fin de la montaison, est en moyenne de 11 racines par jour et par plante. L'émission des racines s'arrête vers la fin de la montaison. Une plante en compte alors en moyenne plus de 500 dans nos conditions de culture. En fin de cycle, on assiste à la disparition d'un certain nombre de racines, ce qui correspond à une régression du nombre de talles, puisque le nombre de racines par talle reste constant (tableau n° 19).

En absence de labour, l'émission des racines est de 4 par plante et par jour en moyenne soit nettement moins qu'avec Labour. Par contre, la formation de racines adventives se prolonge plus tard, jusqu'après la floraison. Leur nombre total des racines est toujours nettement inférieur à celui des plantes cultivées sur Labour, particulièrement au stade montaison. Néanmoins, si l'on considère le nombre de racines par talle (tableau n° 19), celui-ci reste constant tout au long du cycle, à partir du trente deuxième jour. On compte alors environ 20 racines par talle, soit la même valeur que les résultats obtenus sur Labour. Finalement, le nombre de racines nettement supérieur des plantes cultivées sur labour par rapport à un témoin sans travail du sol., correspond seulement à une différence importante dans le nombre de talles par plante.

Tableau n° 19 : Evolution du nombre de racines par plante et par talle au cours du cycle du riz pluvial

Variétés	IKP		63-83		IGUAPE CATETO	
	Témoin	Labour	Témoin	Labour	Témoin	Labour
Nombre total de racines par plante						
Début tallage (15 jours)	5	6	5	7	6	6
Tallage (32 jours)	97	128	99	107	94	113
Montaison (65 jours)	194	537	169	372	126	259
Fin floraison grain laiteux (92 jours)	323	536	196	413	280	421
Récolte (110 jours)	200	393	171	343	141	368
Nombre de racines par talle						
Tallage (32 jours)	22	11	39	9	29	10
Montaison (65 jours)	18	21	39	26	28	17
Fin floraison grain Laiteux (92 jours)	20	20	38	29	34	33
Récolte (110 jours)	13	20	-	35	-	28

5.2.2. - Variétés 63-83 et IGUAPE CATETO

La période d'émission des racines se prolonge plus longtemps que celle de la variété I K P, sauf sur la variété 63-83 sans travail du sol, pour laquelle les conditions de végétation ont été mauvaises, avec en particulier pour conséquence un arrêt précoce du tallage (figure n° 34).

Entre le début du tallage et la montaison (65 jours), il apparaît en moyenne de 5 à 7 racines par jour sur les variétés 63-83 et IGUAPE CATETO cultivées avec labour, tandis que, sur le témoin, le rythme d'émission des racines est deux fois moins rapide. Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues sur la variété I K P surtout avec labour,

Par contre, on observe (tableau n° 19) que le nombre de racines par talle des deux variétés 63-83 et IGUAPE est supérieur à celui de La variété I K P. Le labour a plus d'effet sur Le nombre de talles que sur le nombre total de racines, ce qui fait que le nombre de racines par talle des variétés 63-83 et IGUAPE est plus faible sur Labour que sur Le témoin, surtout en début de cycle.

IL existe donc des différences souvent appréciables entre les variétés. Avant d'en tirer des enseignements, il reste cependant à en mesurer les conséquences sur la profondeur de l'enracinement et la masse totale des racines.

5.3. - Évolution du front racinaire au cours du cycle de la plante

5.3.1. - Variété I KONG PAO

On observe que La vitesse de progression du front racinaire est d'abord relativement rapide pendant La phase de tallage, jusqu'au trente deuxième jour ; à ce stade, la profondeur de L'enracinement est de 36 cm sur Labour et de 20 cm à 25 cm sur témoin (figure n° 35 et tableau n° 20). Ensuite, le front racinaire continue de progresser jusqu'à La fin du cycle, mais extrêmement lentement pour atteindre 40 cm sur labour et 25-30 cm sur Le témoin. En fait, Le système racinaire de la variété I K P a presque atteint sa profondeur maximale après 30 à 35 jours de végétation, et, même sur labour, il reste toujours superficiel..

Tableau n° 20 : Effet du Labour sur La profondeur de "enracinement du riz pluvial (en cm)

	I K P		Différence (test t)	63-83	IGUAPE		Différence (test t)	CATETO
	Témoin	Labour		Labour	Témoin	Labour		
↑ 1 - - m - - - - Début tallage (15 jours)	8	10	N S	13	9	12	NS	
! Tal lage (32 jours>	20	35	S	34	25	34	S	
Montaison (65 jours)	23	36	S	46	27	41	N S	
Floraison grain lai teux (92 jours)	25	39	S	51	29	46	S	
i Récolte (110 jours)	30	40	-	55	32	46	"	

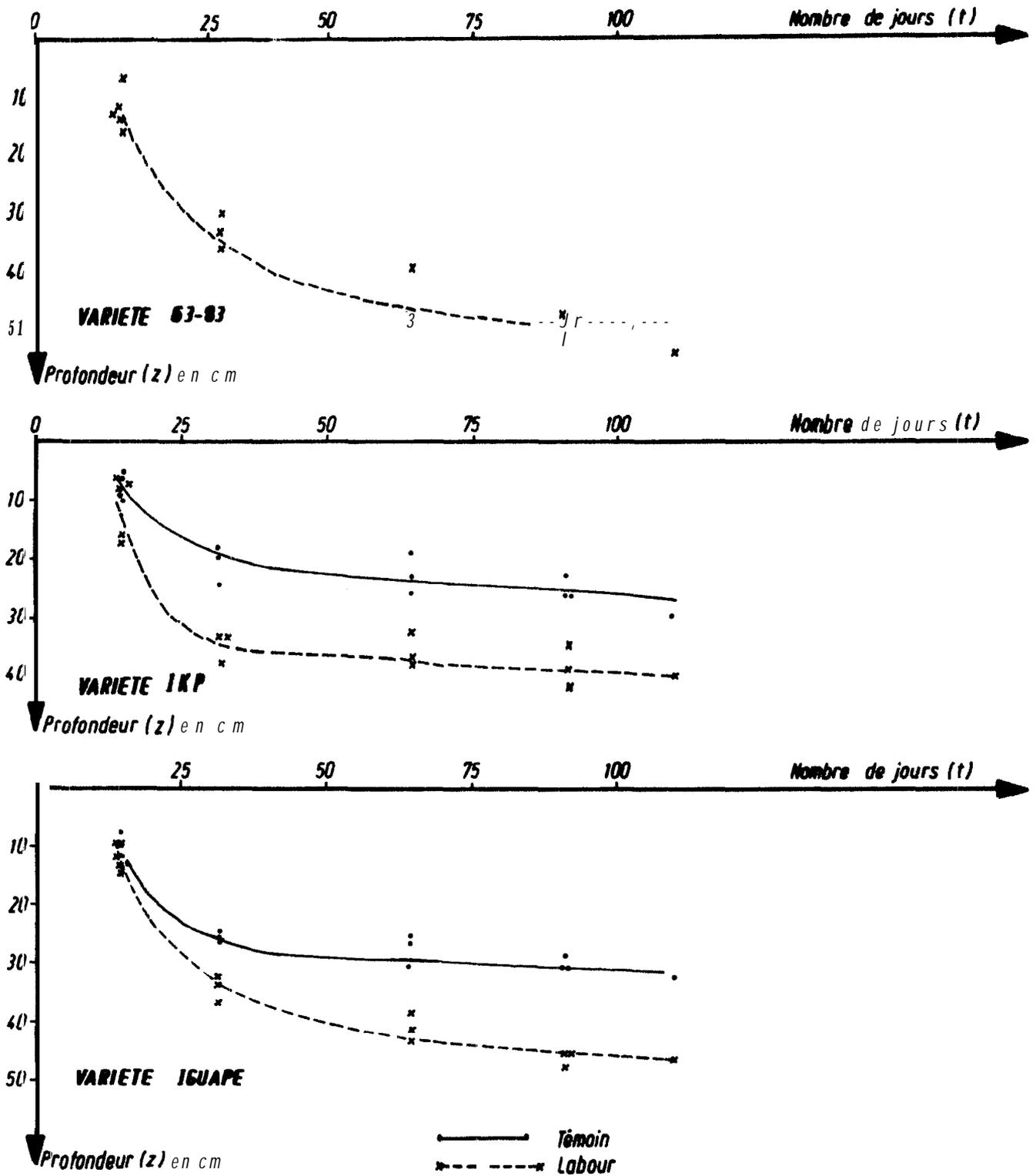


Fig. n° 35 Evolution du front racinaire
du riz pluvial (variétés 63-83, I K P, IGUAPE)

5.3.2. - Variétés 63-83 et IGUAPE CATETO

L'allure générale des courbes d'évolution de la profondeur de l'enracinement des variétés 63-83 et IGUAPE CATETO est comparable à celle de la variété I K P (figure n° 35).

Les résultats obtenus sur le témoin de la variété 63-83 n'ont pas été retenus, l'enracinement reste très superficiel pendant la première moitié du cycle, à cause de difficultés de levée et de croissance dues à des mauvaises conditions de culture. On notera seulement, qu'en fin de cycle, les racines atteignent une profondeur moyenne de 35 à 40 cm.

Jusqu'au trentième jour, les évolutions du front racinaire des variétés 63-83 et IGUAPE sont comparables à celles de la variété I K P. Ensuite, des différences apparaissent : les variétés IGUAPE et 63-83 ont des systèmes racinaires plus profonds. En fin de cycle, la profondeur maximale de l'enracinement de l'IGUAPE atteint 45 cm et 55 cm pour la variété 63-83.

Le travail du sol a un effet marqué sur toutes les variétés. Les différences dues au labour sont en général plus importantes que les différences variétales, bien que celles-ci ne soient pas négligeables.

La profondeur de l'enracinement du riz pluvial apparaît donc comme très faible dans les conditions expérimentales de l'étude. Les valeurs les plus importantes (55 cm) sur la variété 63-83 cultivée avec labour sont très inférieures à celles généralement observées en Côte d'Ivoire. Dans ce pays l'évolution du front se prolonge jusqu'à la récolte (REYNIERS, KALMS et RIDDERS, 1976) et atteint des valeurs comprises entre 55 et 100 cm de profondeur (PICARD et JACQUOT, 1976 ; REYNIERS, KALMS et RIDDERS, 1976). Mais ces résultats ont été obtenus dans des milieux et avec des variétés différentes, on ne peut donc pas préciser si les modifications du comportement du système racinaire en profondeur sont dues aux propriétés du sol ou aux variétés.

5.4. - Evolution du poids total de matière sèche des racines au cours du cycle de la plante

Les résultats sont exprimés en grammes par plante (figure n° 36 et tableau n° 21).

5.4.1. - Variété 1 KONG PAO

En absence de travail du sol profond, la croissance de la matière sèche du système racinaire est linéaire, entre le début du tallage et la récolte (110 jours) le poids sec total des racines est alors d'un peu plus de 5 g/plante.

Sur labour, la croissance est plus rapide, surtout vers la fin du tallage, entre le trente deuxième et le soixante cinquième jour; dès ce stade, le poids sec du système racinaire a presque atteint sa valeur maximale (environ 7 g/plante). C'est au cours de la montaison que l'effet du labour est le plus marqué (plus de 100 %).

Tableau n° 21 : Poids sec total des racines des variétés I K P, 63-18 et IGUAPE CATETO aux différents stades de végétation (en g/plante).

	I K P		63-83		IGUAPE CATETO	
	Témoin	Labour	Témoin	Labour	Témoin	Labour
15 jours	0,027	0,022	0,030	0,033	0,022	0,036
32 jours	1,33	1,42	0,71	1,44	0,92	2,03
65 jours	2,99	6,70	2,38	6,63	2,83	8,50
92 jours	4,51	6,95	2,69	9,03	5,08	8,45
110 jours	5,27	7,14	4,25	8,3	7,51	11,91

5.4.2. - Variétés 63-83 et IGUAPE CATETO

Comme pour la variété 1 K P, la croissance racinaire du témoin est linéaire entre le début du tallage (15 jours) et la récolte (figure n° 36). Les valeurs obtenues sur la variété IGUAPE sont assez comparables à celles de la variété 1 K P ; celles de la variété 63-83 sont anormalement basses.

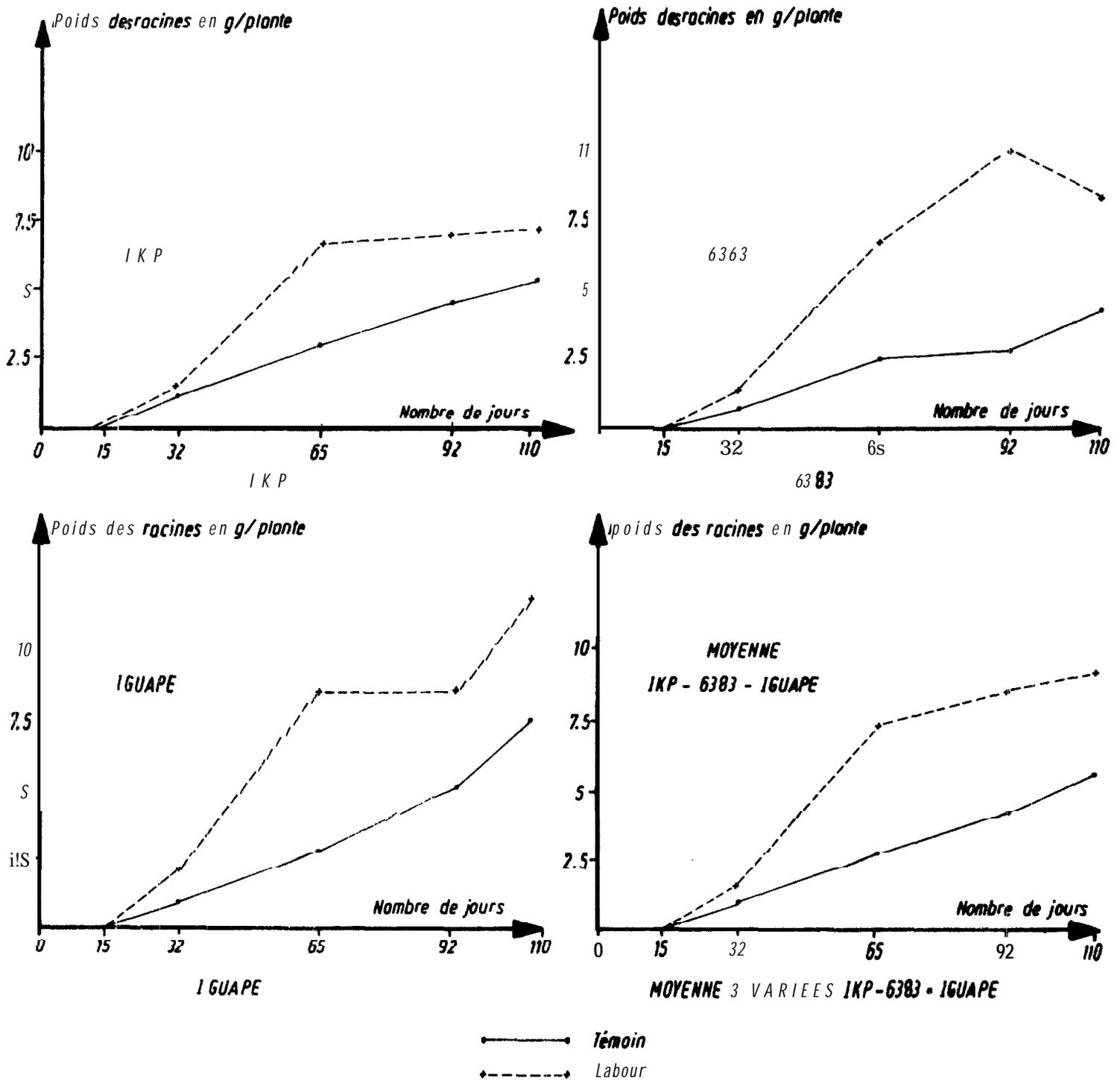


Fig. n° 36 Evolution du poids de matière sèche des racines
de riz pluvial (var. IKP- 6383-IGUAPE)

Les résultats obtenus sur Labour sont un peu plus irréguliers ; il semble cependant que la période de croissance racinaire se prolonge un peu plus tard que celle de la variété I K P.

En fin de cycle, le poids sec total des racines par plante est d'environ 8,5 g pour la variété 63-83 et 10 g pour IGUAPE, si l'on fait la moyenne des résultats obtenus aux stades grain laiteux et récolte. Ces deux variétés ont donc une production de matière sèche de racines supérieure à la variété I K P.

On observe par ailleurs, qu'à partir de la fin du tallage, l'effet du Labour est toujours très marqué.

Nous allons maintenant examiner le comportement des parties aériennes et l'évolution des rapports entre les parties aériennes et les racines.

5.5. - Evolution du rapport parties aériennes/racines au cours du cycle de la plante

5.5.1. - Variété 1 KONG_PAO

La courbe d'évolution du poids sec des organes végétatifs (tiges + feuilles) des pieds prélevés, a une allure globalement comparable à celle des racines (figure n° 37).

Sur Labour, les valeurs du rapport PA/R augmentent régulièrement entre le début du tallage (15 jours) et le stade grain laiteux (95 jours) ; elles passent de 1,5 à 10 (figure n° 38). Sur le témoin, ce rapport est d'abord constant en début de cycle avec une valeur moyenne de 1,5, puis augmente jusqu'à une valeur de 8 au stade grain laiteux (92 jours). En fin de cycle, le rapport PA/R paraît se stabiliser sur les deux traitements (figure n° 38).

5.5.2. - Variétés 63-83 et IGUAPE CATETO

En tout début de cycle (15 jours), le rapport PA/R des deux variétés 63-83 et IGUAPE CATETO est faible et comparable à celui de l'I K P. Ensuite, le rapport augmente mais reste généralement inférieur à celui de la variété IKP. En fin de cycle, les valeurs sont de 6 environ sur les deux variétés cultivées avec labour. Sur le témoin, le rapport PA/R est en moyenne de 4,5 sur la variété 63-83, tandis que sur la variété IGUAPE, il reste toujours faible (3 environ).

On observe donc des différences marquées entre la variété I K P et les deux autres, ce qui pourrait expliquer en partie la plus grande sensibilité de la variété I K P à des stress hydriques.

Le labour a aussi pour effet d'augmenter le rapport PA/R, comme nous l'avons d'ailleurs déjà noté sur chacune des autres espèces étudiées. Dans le cas du riz pluvial et des autres céréales, l'effet du labour plus important sur le poids sec des parties aériennes que sur celui des racines ne peut s'expliquer, en première analyse, que par l'intermédiaire des racines : meilleure extraction racinaire de l'eau et des éléments minéraux en présence de labour grâce à leur morphologie ou leur fonctionnement. A cet égard, la répartition des racines dans le profil et la colonisation des couches plus profondes que nous allons maintenant examiner, peuvent jouer un rôle important, surtout pour le riz pluvial dont le front racinaire reste toujours superficiel, et qui est très sensible au stress hydrique.

5.6. - Evolution du poids sec des racines en fonction de la profondeur et du stade de végétation

La profondeur maximale de l'enracinement fluctue en fonction de la variété et du travail du sol entre 30 et 55 cm. En dessous de 30 cm, la densité racinaire est toujours faible, et, avec la méthode de prélèvements de racines par cylindres, utilisée ici, les résultats sont très hétérogènes. A cause de cela, et aussi pour des raisons matérielles, on s'est limité à l'étude de la variation de la densité racinaire entre 0 et 30 cm. Les prélèvements ont été réalisés sur une culture semée en lignes à 40 cm d'écartement.

5.6.1. - Variété I K P

En présence d'un labour, à 20 cm environ, le profil racinaire exprimé en g/dm^3 de sol peut être assimilé à une droite (figure n° 39) aux trois stades de végétation étudiés : tallage (37 jours), montaison (62 jours) et floraison (81 jours). Le gradient de densité racinaire en fonction de la profondeur est donc toujours régulier, mais la pente de la droite est variable. En début de cycle, elle est faible : la densité racinaire passe seulement de $0,4 g/dm^3$ entre 0 et 10 cm à $0,2 g/dm^3$ entre 20 et 30 cm.

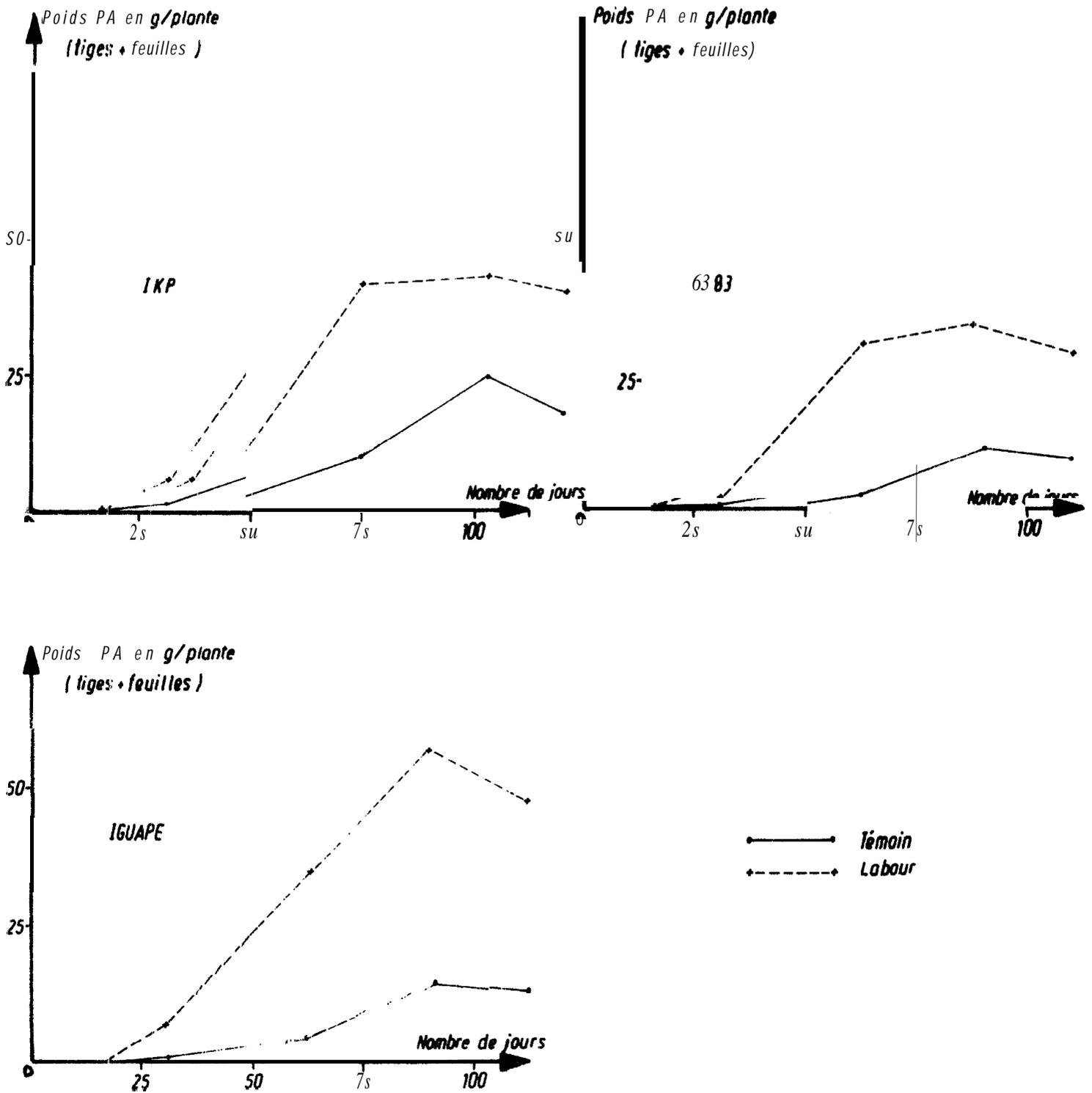


Fig n° 37 Enracinement du riz pluvial: évolution du poids de matière sèche des parties aériennes des pieds prélevés
(var. IKP, 6383, IGUAPE)

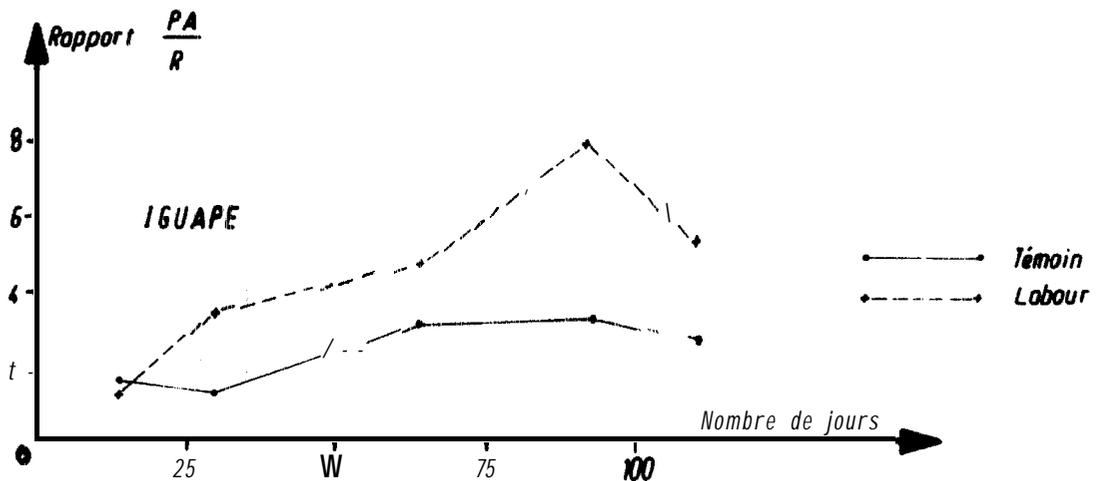
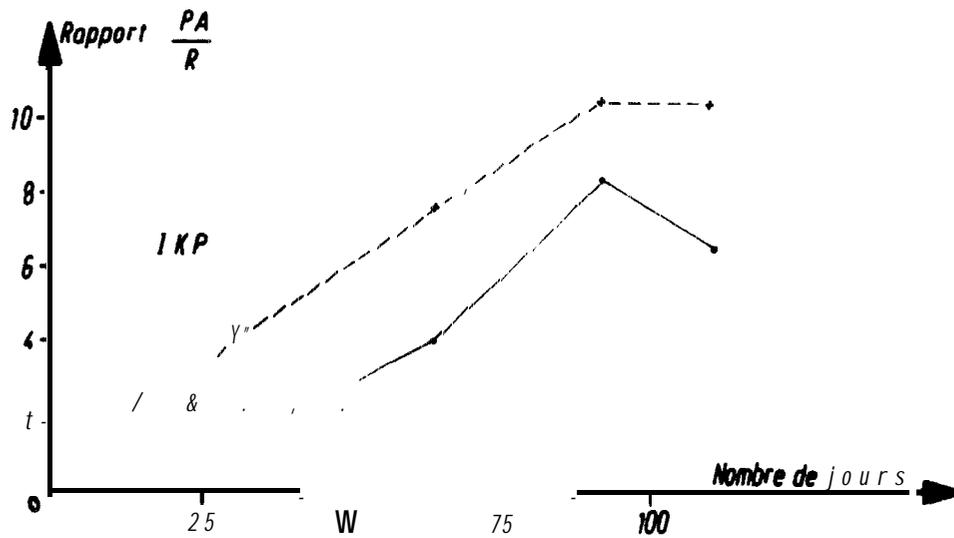
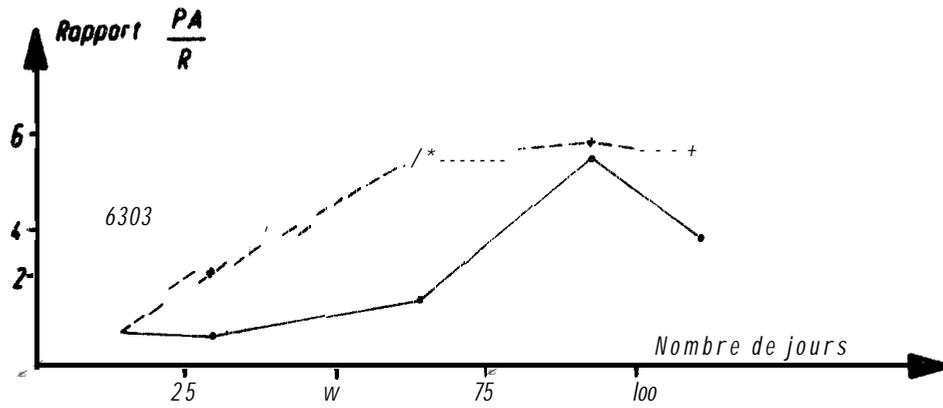


Fig.n° 38 Evolution du rapport poids total parties aériennes/ racines du riz pluvial (variétés I KP - 63 83 - IGUAPE)

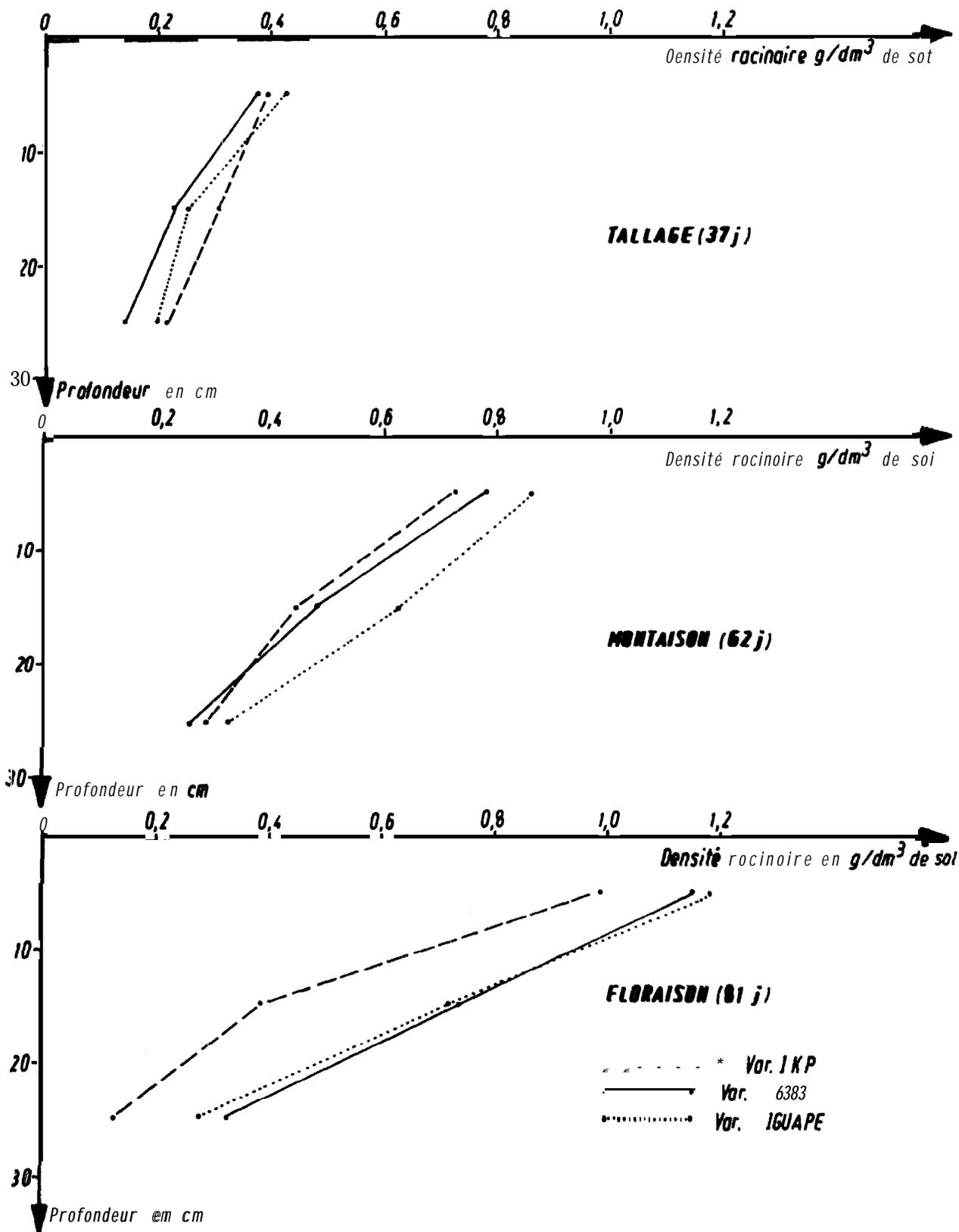


Fig. n° 39 Profils racinaires des variétés de riz pluvial
I K P, 6383 et IGUAPE à 37-62 et 81 jours avec labour

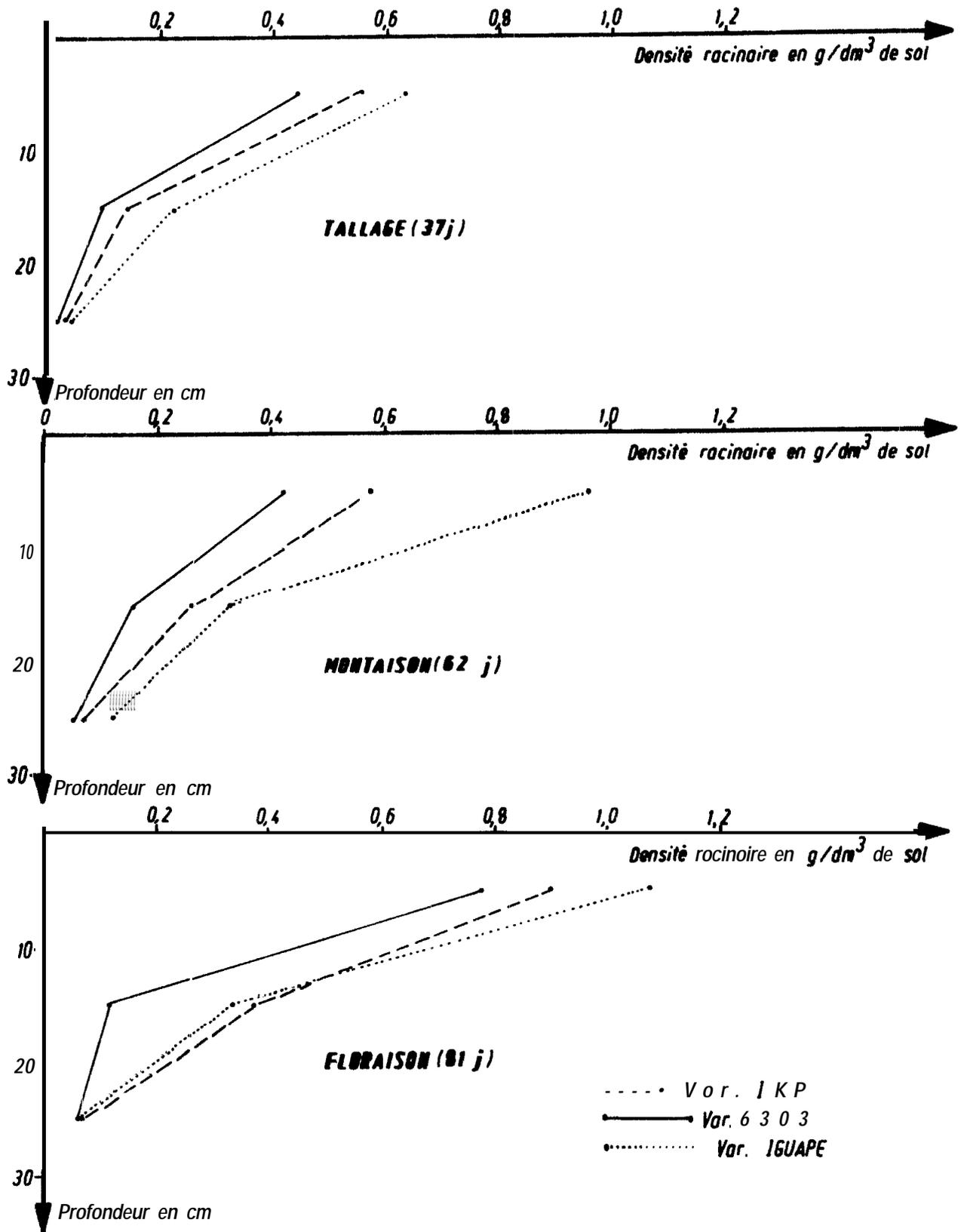


Fig n^o 40 Profils racinaires des variétés de riz pluvial

1 K P, 6383 et IGUAPE à 37 - 62 et 81 jours sans labour

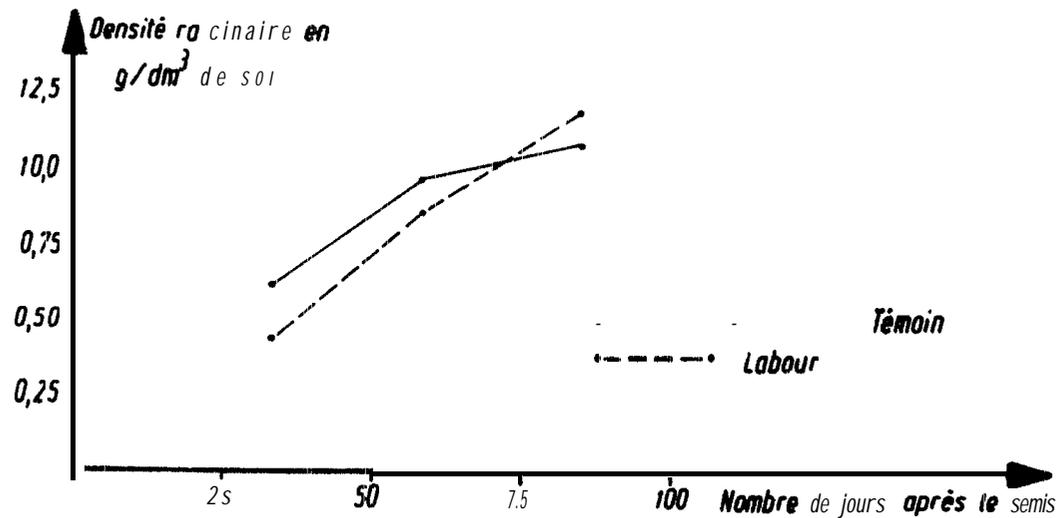
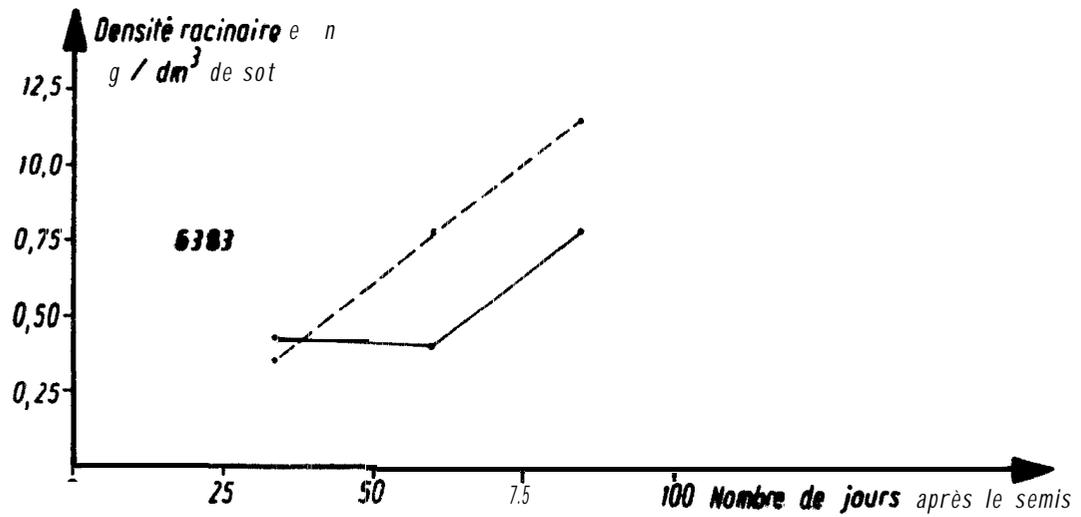
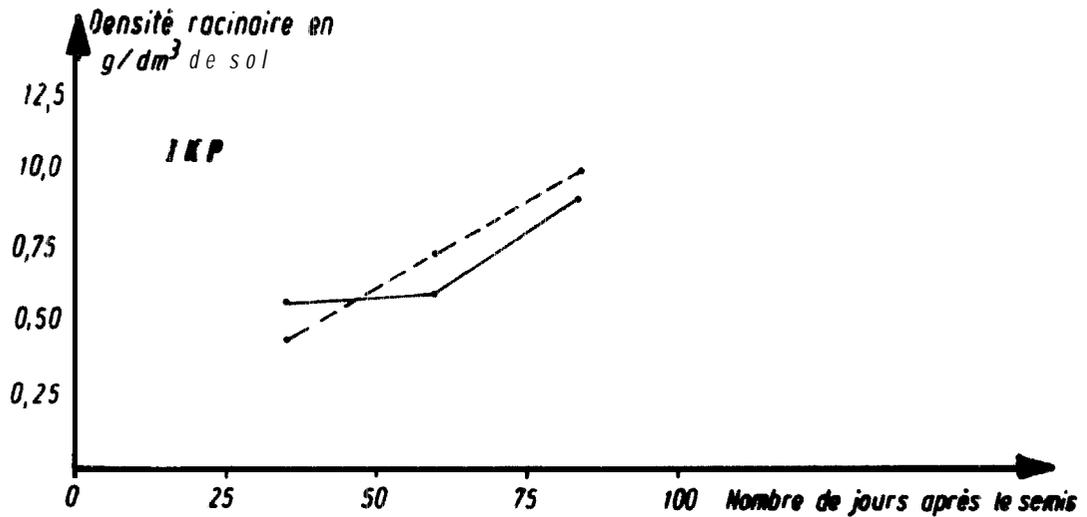


Fig.n° 41 Evolution de la densité racinaire en g/dm^3 du riz - pluvial - entre 0 et 10 cm (variétés 1KP, 6383, IGUAPE)

Au stade montaison, et surtout au stade floraison, Le gradient de densité racinaire est nettement plus accentué. Cette densité racinaire est de 1 g/dm^3 entre 0 et 10 cm à La floraison, alors qu'elle n'a pas beaucoup varié depuis le stade tallage dans l'horizon 20-30 cm. En début de cycle, Le système racinaire de La variété I K P colonise rapidement l'horizon 20-30 cm, puis l'augmentation du poids sec des racines se fait surtout dans les horizons de surface. On assiste donc à une progression rapide du front racinaire comme nous l'avons vu précédemment ; celui-ci atteint rapidement l'horizon 20-30 cm, mais la colonisation réelle et intense du sol ne se produit que plus tard.

En absence de labour, avec seulement un grattage superficiel du sol sur 5 à 8 cm, les profils racinaires sont assez différents : à chaque stade, le gradient en fonction de La profondeur est d'abord important entre les horizons 0-10 cm et 10-20 cm, puis plus faible entre 10-20 et 20-30 cm où il y a toujours très peu de racines (figure n° 40). Cela correspond, on le rappelle, à une vitesse d'avancement du front plus lente qu'en présence d'un Labour. Les racines prospectent donc surtout La couche de sol la plus superficielle, au détriment de la colonisation potentielle (profondeur du front racinaire) et réelle (densité racinaire) des horizons de profondeur.

Finalement, entre 0 et 10 cm, les différences entre traitements, témoin et labour, sont toujours faibles (figure n° 41). Par contre, entre 10 et 30 cm, l'effet du Labour est spectaculaire (figure n° 42). Ainsi, aux stades tallage et floraison, l'amélioration moyenne de la densité racinaire grâce au labour est de 150 % dans l'horizon 10-30 cm.

5.6.2. - Variétés 63-83 et IGUAPE CATETO

Les différentes observations précédentes se trouvent en général confirmées sur Les deux variétés, en particulier l'effet du labour sur la colonisation de la couche 10-30 cm.

Les différences variétales sur la production de matière sèche totale des racines, observées précédemment, se répercutent sur La densité racinaire de chacune des trois couches de sol étudiées.

Le labour a donc un effet marqué sur la masse totale des racines mais il assure aussi une colonisation nettement améliorée des horizons de profondeur en dessous de 10 cm, sur chacune des variétés étudiées. La colonisation des horizons de profondeur de la variété II K P est inférieure à celle des deux variétés,

Dans les conditions de milieu où le riz pluvial a été cultivé, le système racinaire se différencie nettement des autres espèces étudiées par sa faible profondeur. Cette profondeur du front racinaire est par ailleurs nettement inférieure à celle enregistrée dans d'autres conditions ; c'est ainsi, qu'en Côte d'Ivoire, elle peut atteindre un mètre avec, il est vrai, des sols et des variétés différentes.

Toutefois, le poids sec total des racines est quand même important. En présence d'un travail du sol., il varie de 7 à 12 g par plante suivant les variétés, soit de 80 à 130 g par m². Ces valeurs ne sont que légèrement inférieures à celles enregistrées en Côte d'Ivoire. Il n'a pas été possible de caractériser les valeurs de longueur totale des racines au moment de cette étude. Des mesures récentes mais plus ponctuelles, réalisées sur la variété I K P avec labour donnent des valeurs de distances moyennes entre les racines de 0,5 cm, 0,7 cm et 1,5 cm respectivement dans les horizons 0-10, 10-20, et 20-30 cm.

Le système racinaire du riz pluvial est donc très superficiel mais le sol est très bien colonisé dans les horizons de surface, au moins lorsqu'il a été labouré. En effet, l'influence du Labour est très spectaculaire sur chacune des caractéristiques du système racinaire, sauf le nombre de racines adventives primaires émises à partir de chaque talle qui paraît être une caractéristique plutôt liée à la variété,

La variété I KONG PAO a une profondeur d'enracinement plus faible, et un poids total de matière sèche du système racinaire inférieur aux autres variétés, en particulier dans les horizons plus profonds, pour un poids de matière sèche des parties aériennes comparable. Le développement du système racinaire pourrait donc à lui seul expliquer la plus grande sensibilité de la variété I K P à des arrêts momentanés des pluies, comme cela est généralement observé.

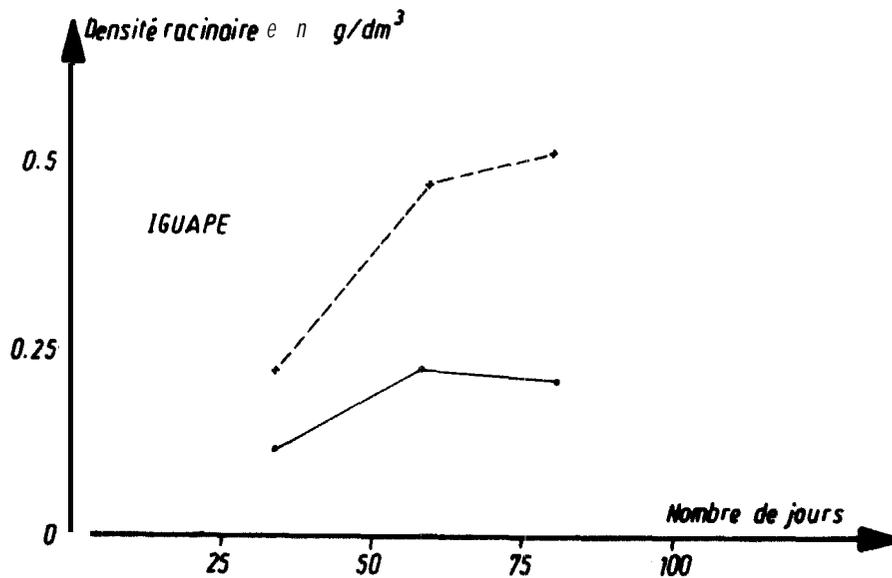
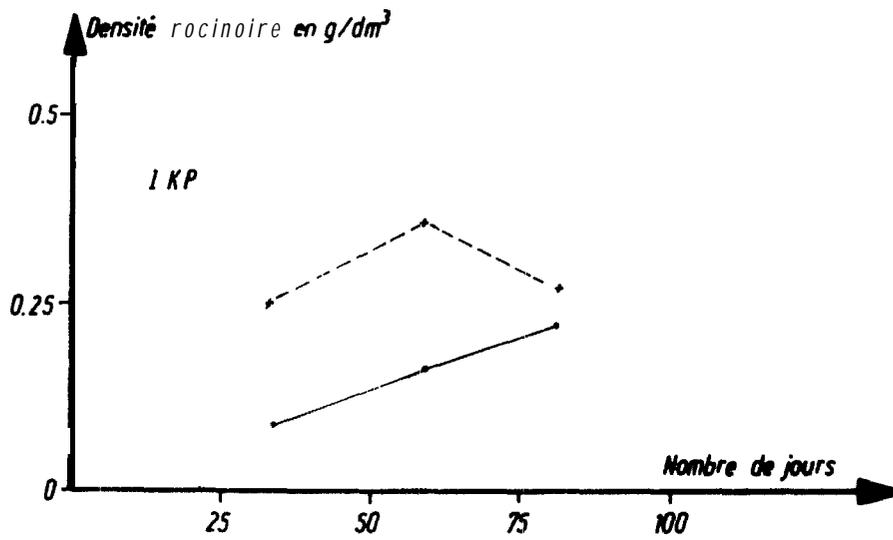
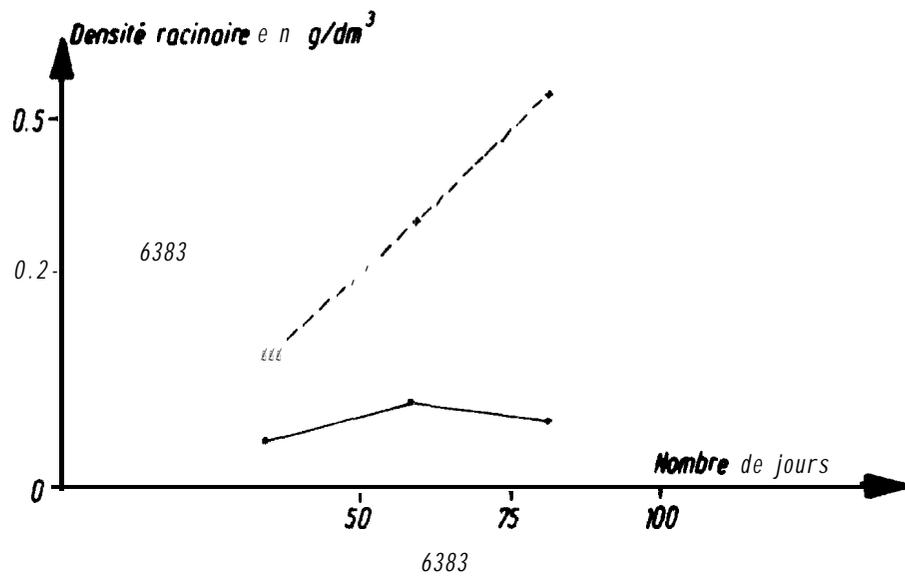


Fig. n° 42 Evolution de la densité racinaire en g/dm³ entre 10 et 30 cm (variétés 1 KP - 6383 - IGUAPE)

VI. - CONCLUSION

Les différents critères retenus ont permis une bonne caractérisation des systèmes racinaires des quatre espèces étudiées.

Les mesures du front racinaire, du poids sec et de la Longueur totale des racines à différents niveaux dans le sol sont, à cet égard, particulièrement intéressants pour juger de la colonisation du sol par les racines.

Pour chacune des espèces étudiées, on retrouve quelques similitudes, par exemple, Les allures des courbes de croissance. Mais on remarque aussi, comme on pouvait s'y attendre, de nombreuses différences dont L'importance varie *d'ailleurs* suivant les critères utilisés. IL parait donc intéressant, pour chacun des critères de caractérisation des systèmes racinaires, de comparer les principaux résultats obtenus sur les différentes espèces et d'examiner Les 'conséquences que cela peut avoir dans certains aspects de l'agronomie au **Sénégal**.

QUATRIÈME PARTIE

DISCUSSION ■ CONCLUSIONS

I. - INTRODUCTION

La connaissance que nous avons maintenant de plusieurs caractéristiques des systèmes racinaires sur chacune des principales cultures annuelles au Sénégal va nous permettre de Les comparer et donc de mettre en relief Les différences.

Cette étude ayant été réalisée en deux conditions de travail du sol : témoin et Labour, nous pourrons aussi comparer Les effets du travail du sol sur Les systèmes racinaires de chacune d'entre elles.

Les conséquences que nous en tirerons porteront sur les possibilités d'alimentation hydrique et minérale des espèces dans les conditions de milieu du Sénégal, sur L'intérêt agronomique du travail L du sol dans ce pays et sur Le rôle que peuvent avoir les systèmes racinaires dans Le bi Lan organique du sol.

II. - COMPARAISON DES SYSTEMES RACINAIRES DES DIFFERENTES ESPECES

Nous commencerons par comparer Les espèces suivant Le critère de poids total de matière sèche qui est le plus couramment utilisé, et Le rapport entre Le poids des parties aériennes et celui des racines. Les résultats ont été ramenés à la production par mètre carré de surface cultivée après labour et avec des densités de plantes suivantes :

- Mi L et sorgho : 1 poquet par m²
- Arachide : 15 plantes par m²
- Riz pluvial : 11 plantes par m²

Nous examinerons ensuite L'évolution du front racinaire et La répartition des racines dans le profil de sol chez les différentes espèces.

Pour al léger le propos, La comparaison des espèces se fera en conditions de culture sur sol labouré. Les différences de comportement avec et sans travail du sol seront examinées plus Loin.

2.1. - Poids total des racines

L'évolution du poids total des racines par m^2 de culture au cours du cycle est rappelée pour chaque espèce dans La figure n° 43. Les courbes de croissance sont assez différentes. Le riz pluvial et L'arachide dont Les densités de semis sont Les plus fortes produisent, en début de cycle, une quantité de racines supérieure au mil et au sorgho par unité de surface, ce qui est normal compte tenu du nombre d'appareils racinaires plus important. Si l'on considère Le poids total de racines par plante Le trentième jour, Le classement n'est plus le même : c'est le sorgho qui a Le poids de racines Le plus important, avec 2,5 g/plante, suivi du riz (1,5 g/plante), du mil (1 g/plante) et enfin de l'arachide (0,5 g/plante).

Chez Le mil et surtout chez le sorgho, La vitesse de croissance devient très élevée à partir du trentième jour.

La phase de croissance rapide s'arrête au milieu du cinquantième jour, un peu plus tard chez Le sorgho. La croissance pondérale de L'arachide s'arrête ou ralentit fortement à partir du quarante cinquième jour. Seul, le riz pluvial voit donc sa croissance se prolonger jusqu'à La récolte.

Au total, en fin de cycle, c'est Le riz pluvial et Le sorgho qui ont Les productions de racines Les plus importantes par unité de surface cultivée (environ 100 g/m²). Les deux espèces cultivées en sols sableux ont des productions nettement inférieures, de 35 à 40 g/m² ce qui, pour l'arachide, représente un très faible poids de racines par plante.

Cependant, pour mieux apprécier ces différences, et en tirer des conséquences sur Le plan de La nutrition de La plante, il faut tenir compte du développement des parties aériennes.

2.2. - Relation entre le poids des parties aériennes et celui des racines

Les résultats synthétiques sont rappelés sur La figure n° 44. Il apparaît que, dès Le début du cycle, Le rapport PA/R devient rapidement élevé chez Le mil et l'arachide, tandis qu'il reste nettement plus faible sur les deux espèces jusque vers Le quarantième jour. Ces résultats peuvent surprendre, car Le mil et l'arachide sont justement les espèces qui subissent plus fréquemment Les irrégularités de La pluviométrie en début de cycle ; cela correspond à un démarrage rapide de la végétation du mil et de L'arachide.

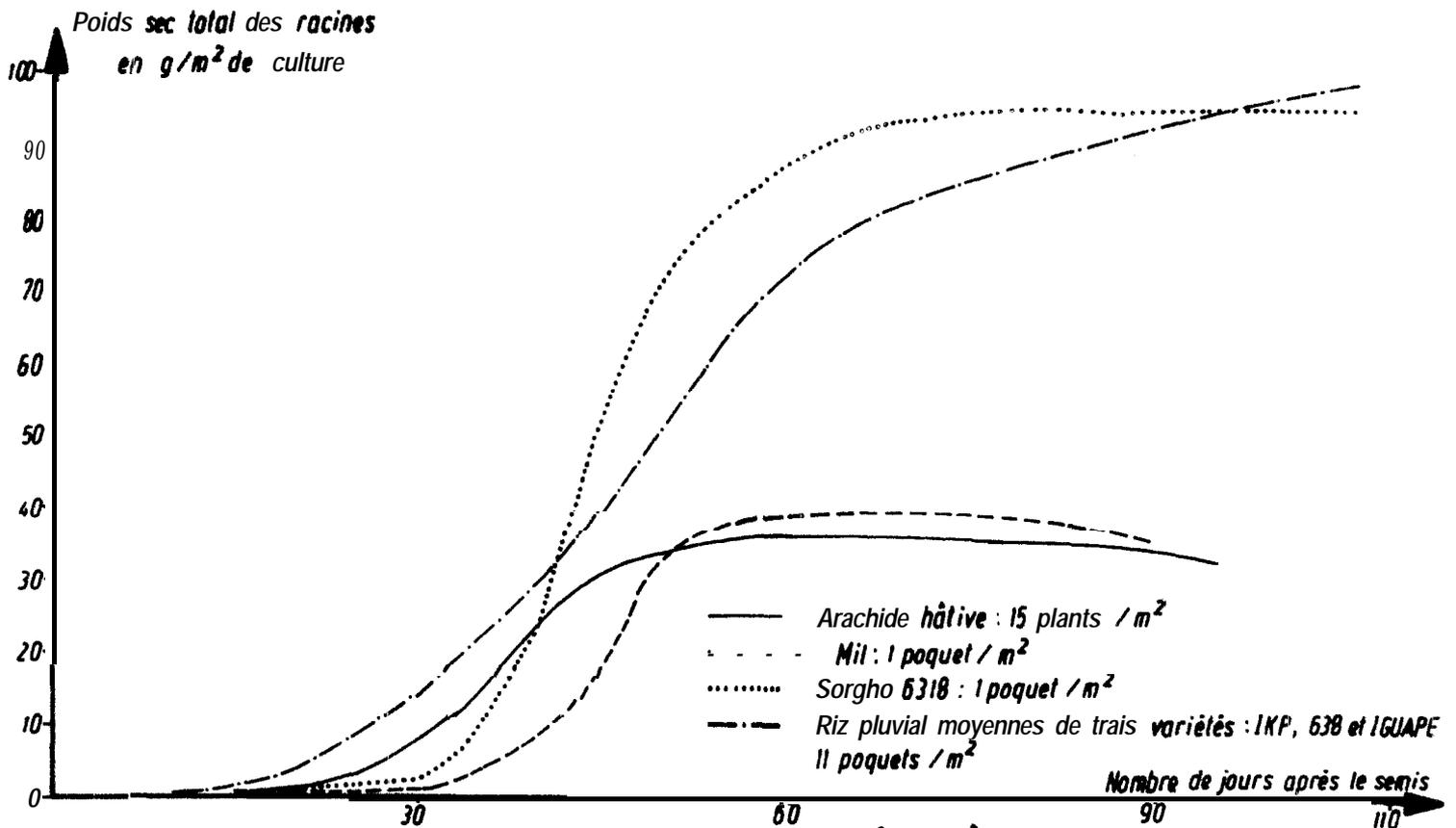


Fig. n° 43 : Evolution du poids total de matière sèche des racines de l'arachide, du mil, du sorgho et du riz pluvial sur sol labouré

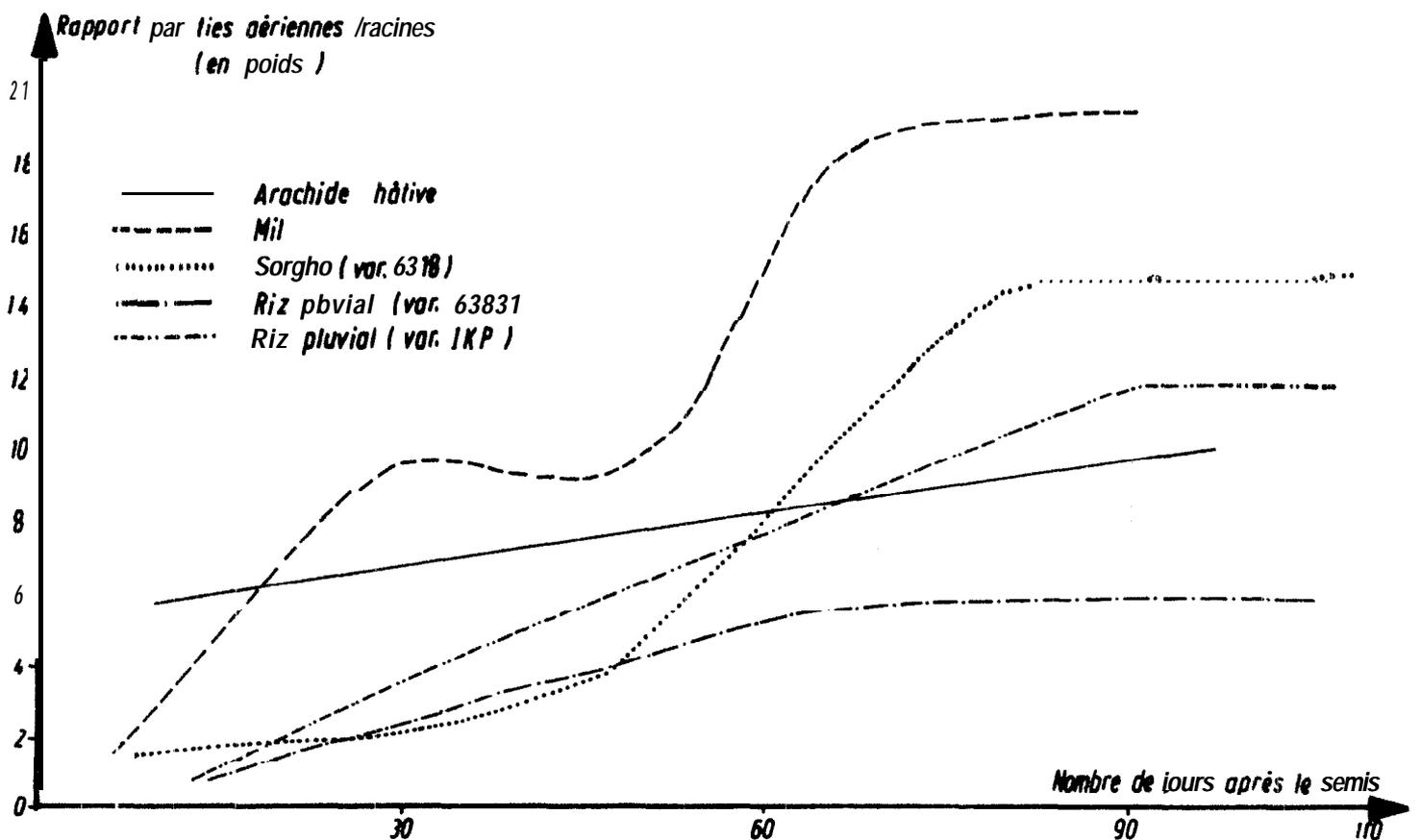


Fig. n° 44 : Evolution du rapport entre k poids des parties aériennes (tiges + feuilles) et k poids des racines de #'arachide, du mil, du sorgho et du riz pluvial

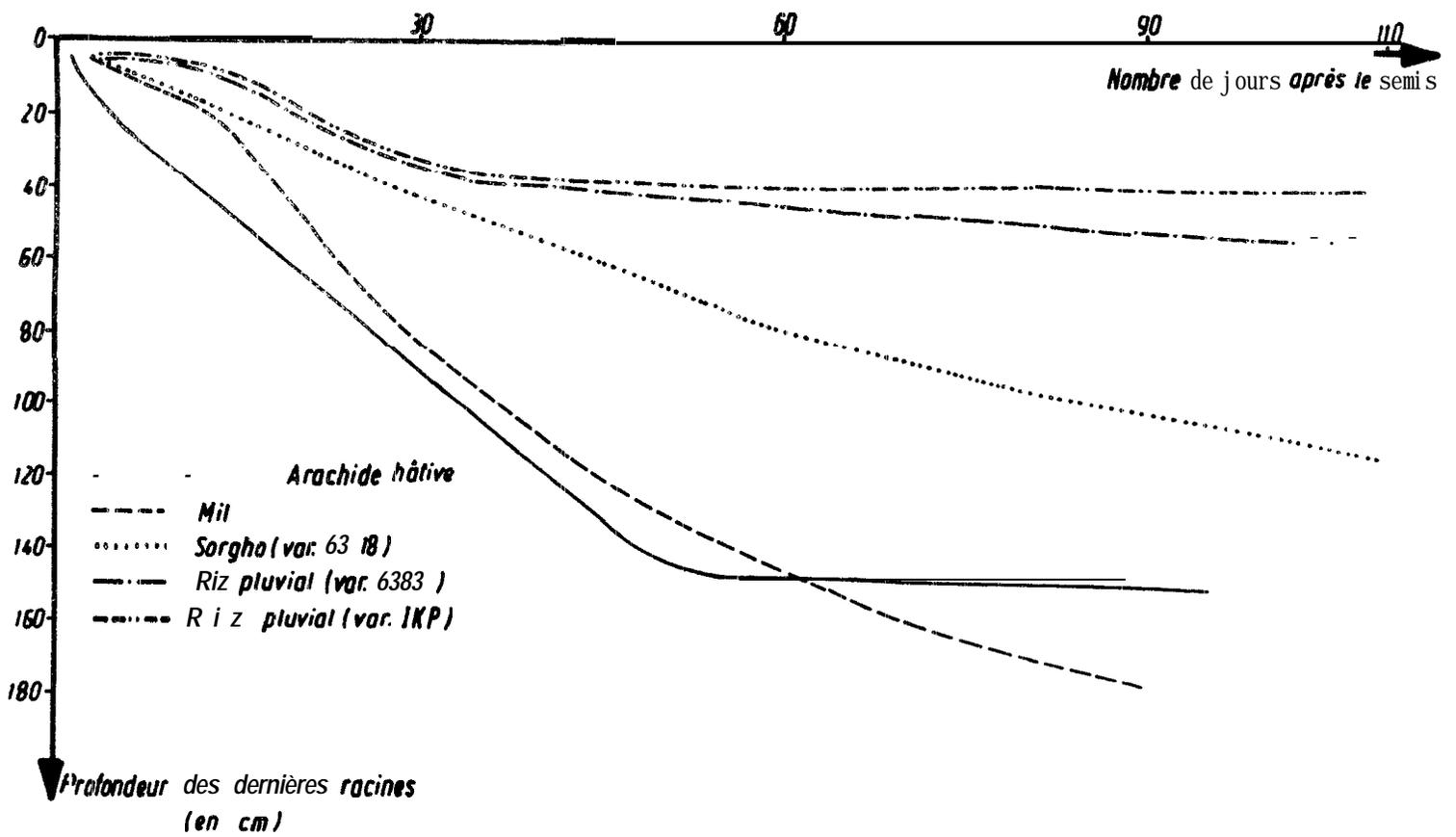


Fig. n° 45 : Evolution du front racinaire de l'arachide, du **mil**, du **sorgho** et du riz pluvial sur sol **labouré**

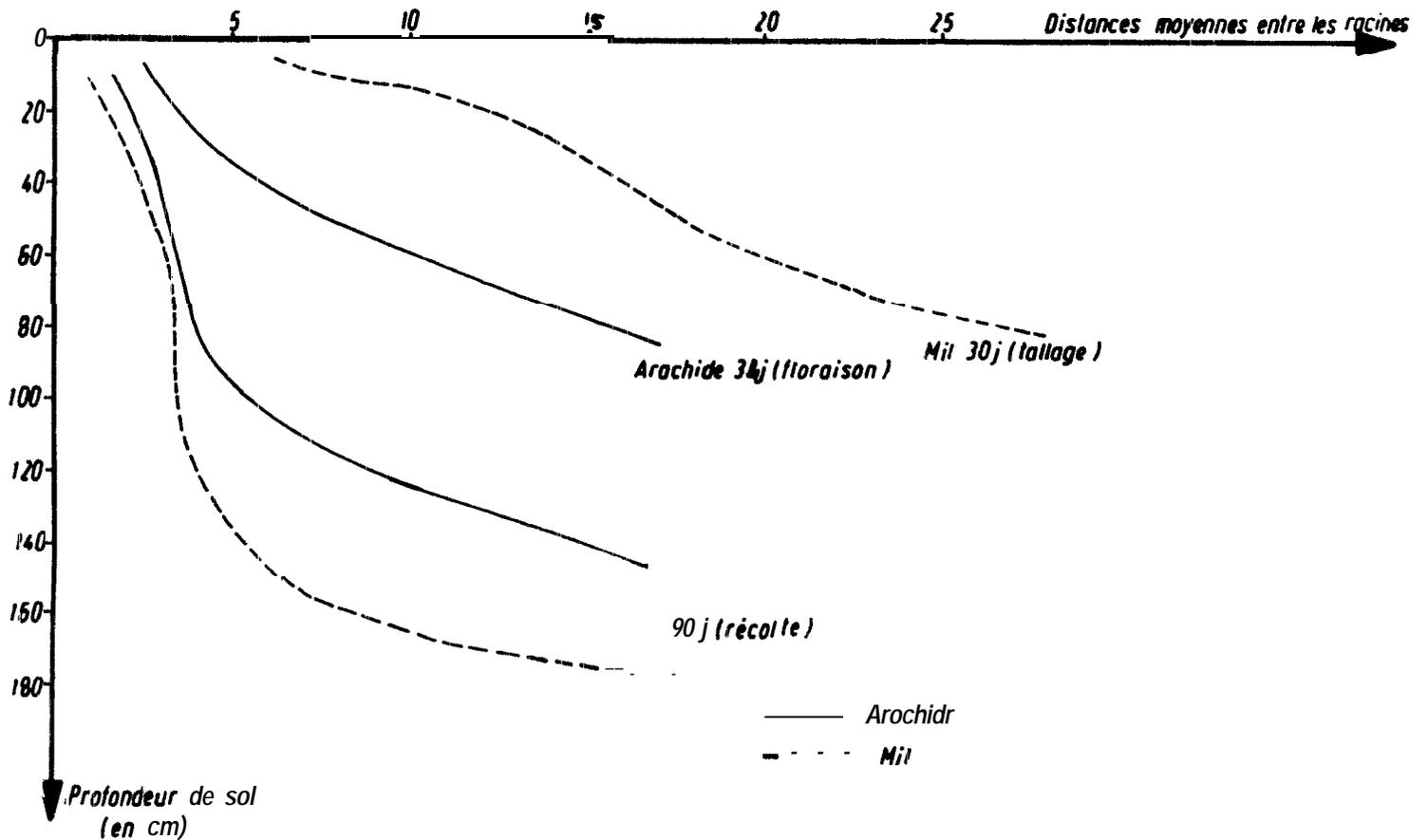


Fig. n° 46 : Profils de **distances** moyennes entre tes racines **d'arachide** et de mil dans le **sol**

Ensuite, Les rapports augmentent chez chacune des espèces mais à des rythmes différents. Dans le cas de L'arachide, l'augmentation est **régulière** et **modérée** du **dixième** jour jusqu'à La récolte ; pendant cette période, La vitesse de croissance des racines n'est donc que Légèrement inférieure à **celle** des parties aériennes, et la faible production de racines par plante **correspond** à un poids sec des parties aériennes assez réduit. Chez le riz pluvial, le rapport PA/R dépend des variétés ; il reste toujours faible chez la variété **63-83**, tandis que chez la variété **I K P**, l'augmentation est régulière jusqu'au **stade** grain Laiteux. La valeur du rapport PA/R du sorgho, s'élève rapidement à partir du moment où la vitesse de croissance des racines commence à se ralentir vers Le cinquantième jour (**montaison**) alors que celle des parties aériennes continue d'être importante. Le rapport entre le poids des parties aériennes et celui des racines de mil est toujours supérieur à celui des trois autres espèces. Il existe, semble-t-il, une phase de stabilisation **temporaire** entre le trentième et le quarante cinquième jour, qui correspond à la période **la plus** rapide de La croissance des racines.

Si l'on se réfère au poids sec des racines et à La proportion que celles-ci représentent dans la production de matière sèche totale de La plante, il apparait donc que les systèmes racinaires du riz pluvial et du sorgho sont **mieux** développés que ceux de l'arachide et surtout du mil.

Mais le seul paramètre poids sec total des racines est insuffisant pour caractériser la colonisation réelle du sol par le système racinaire. Or, c'est surtout ce dernier critère qui permet d'évaluer les possibilités **d'alimentation** hydrique et minérale de La plante.

La colonisation du sol par les différentes **espèces** peut être caractérisée à partir de La profondeur de l'enracinement et de la répartition des racines dans le profil.

2.3. - Évolution du front racinaire au cours du cycle de la plante

La figure n° 45 regroupe Les évolutions des fronts racinaires des **quatre** espèces étudiées. Le classement de celles-ci est très différent de celui réalisé à partir du poids sec. Le sorgho et surtout Le riz pluvial, dont les productions de matière sèche de racines sont Les plus importantes, ont des systèmes racinaires nettement plus superficiels que ceux de L'arachide et du mil.

En début de cycle, pendant la phase de pré-tallage, la vitesse d'accroissement du front racinaire de l'arachide (5 cm/jour) est nettement plus élevée que celle du mil, du sorgho et surtout du riz pluvial. Chez les céréales, le système séminal reste superficiel et les racines adventives n'apparaissent au niveau du collet que huit à douze jours après le début de la germination, tandis que le pivot de l'arachide a une croissance verticale rapide dès la germination de la graine.

Après le qu-izième jour et pendant la phase de tallage, la vitesse d'accroissement de la profondeur de sol prospectée par les racines du mil devient plus rapide (3,5 cm/jour) que celle de l'arachide (2,7 cm/jour). Après le trentième jour, les vitesses deviennent comparables jusque vers le cinquantième jour (début épiaison du mil, fin floraison utile de l'arachide). L'élongation du pivot de l'arachide s'arrête alors brusquement à une profondeur de 140 à 150 cm légèrement plus importante que celle du mil au même moment.

La progression du front racinaire du mil va se poursuivre jusqu'à la récolte, avec une vitesse réduite (un peu plus de 1 cm/jour) ce qui va permettre au front racinaire de cette plante de dépasser la profondeur maximale de l'enracinement de l'arachide vers le soixantième jour (floraison du mil) et d'atteindre, à la récolte, la profondeur moyenne de 180 cm.

Le front racinaire du sorgho progresse régulièrement jusqu'à la fin du cycle de végétation, mais nettement moins vite que le mil (1 cm/jour), pour atteindre 110 cm à la récolte chez la variété 63-18 de longueur de cycle pourtant supérieure à celle du mil.

Quant au riz pluvial, son enracinement atteint de 30 à 40 cm de profondeur vers le trentième jour, soit presque autant que celui du sorgho, mais le front racinaire s'arrête alors à cette profondeur (variété I K P) ou progresse très lentement: pour atteindre 55 cm en fin de cycle (variété 63-83).

La masse totale des racines produite par une culture de sorgho ou de riz pluvial en plein champ est donc globalement plus grande que celle d'une culture de mil ou d'arachide, mais elle est localisée sur une profondeur de sol nettement plus faible, particulièrement dans le cas du riz pluvial.

2.4. - Répartition des racines dans le profil de sol

La colonisation du sol par les racines dans les différents horizons sera d'abord étudiée en prenant comme critère Le poids de racines par volume de sol, puisque c'est Le seul dont nous disposons pour les quatre espèces. Le mil et l'arachide seront aussi comparés grâce aux critères plus intéressants de Longueur et de distances moyennes entre les racines.

Nous avons fait figurer dans Le tableau n° 22 les densités racinaires (en mg/dm^3) à différentes profondeurs de chacune des espèces, lorsque celles-ci sont en fin de cycle,

Tableau n° 22 : Densités racinaires (mg/dm^3 de sol) à différentes profondeurs et pourcentage du total des racines dans Les horizons correspondants (en fin de végétation)

Profondeur (en cm)	Arachide		Mil		Sorgho(63-18)		Riz pluvial	
	Densité racinaire	% du total						
0 - 30	79	65	105	82	210	91	258	100
30 - 60	20	17	10	8	17	7	non mesuré	
60 - 100	13	14	5,7	6	3,8	2		
100 - 150	2,6	4	2,3	3				
150 - 180			1,6	1				

Pour chacune des espèces, la plus grande partie de La masse des racines est Localisée dans les trente premiers centimètres, et les différences enregistrées dans cet horizon correspondent donc globalement à celles observées précédemment en considérant Le poids sec total.

En dessous de trente centimètres, la densité racinaire du riz pluvial n'a pas été mesurée, mais cette-ci doit y être très faible, car entre 20 et 30cm

de profondeur elle n'est déjà plus que de 50 mg/dm^3 et le front racinaire est situé entre 40 et 55 cm, suivant les variétés.

Entre 30 et 100 cm, La densité racinaire et le pourcentage de racines d'arachide sont encore assez élevés. La densité racinaire du sorgho est toujours supérieure à celle du mil entre 30 et 60 cm, mais devient assez faible en dessous de 60 à 70 cm,

La profondeur maximale de l'enracinement du sorgho (variété 63-18) est de 110 cm, et la proportion de racines situées entre 100 et 110 cm est négligeable. Entre 100 et 150 cm, les masses de racines de mil et d'arachide sont comparables, mais faibles. Enfin, en dessous de 150 cm, la densité racinaire du mil ne représente plus que 1 % du poids total des racines, mais c'est la seule espèce étudiée à émettre des racines jusqu'à cette profondeur.

Sur arachide et sur mil, il a été possible de mesurer la longueur totale des racines et sa répartition dans les différents horizons du sol.

Où, si, comme nous l'avons vu, les poids totaux de racines par m^2 de culture sont comparables en fin de cycle chez Le mil et l'arachide, il n'en est pas de même de la longueur totale qui passe de 1500 m/m^2 chez l'arachide à 3000 m/m^2 chez le mil. Il faut attribuer cette différence à l'influence du pivot de l'arachide de fort diamètre et très lignifié dans les dix premiers centimètres de sol ; celui-ci représente donc une proportion appréciable de la masse totale du système racinaire (entre 10 et 20 % en fin de cycle) mais sa longueur est extrêmement réduite. D'autre part, en dessous de 30 à 40 cm de profondeur, Le diamètre moyen des racines est plus faible chez le mil, avec des différences de 35 à 40 % entre 100 et 120 cm (pas de mesure en dessous de 120cm).

Les profils de colonisation du sol obtenus à partir de la longueur totale de racines par volume de sol ou, comme nous l'avons présenté (figure n° 46), sous forme de distances moyennes entre les racines, sont donc différents de ceux obtenus à partir du poids de racines (tableau n° 22).

En début de cycle, vers Le trentième jour, la longueur totale des racines est encore faible chez Le mil (57 m/m^2) ; elle est beaucoup plus importante chez L'arachide (385 m/m^2) ce qui correspond au classement réalisé à partir du poids sec. L'arachide colonise nettement mieux le profil que le mil à ce stade (figure n° 46).

Par contre, en fin de cycle, le mil colonise mieux le profil (figure n° 46) que L'arachide ; les différences sont faibles dans les quatre vingt premiers centimètres de sol où les distances entre les racines sont partout inférieures à 4 cm. En dessous d'un mètre, le mil colonise nettement mieux le sol. A La récolte, les distances moyennes entre les racines dépassent 5 cm seulement en dessous de 140 cm ce qui correspond à une très bonne colonisation du profil. Au même stade, les distances moyennes entre les racines d'arachide commencent à dépasser 5 cm à partir d'un mètre.

Les Longueurs totales de racines n'ont pu être mesurées sur les cultures de sorgho et de riz pluvial.

Cependant, des observations directes faites sur les échantillons de racines montrent que les morphologies et en particulier les degrés de finesse des racines paraissent assez comparables chez le sorgho et le mil. Compte tenu des poids enregistrés, on peut donc estimer que la colonisation du profil par les racines de sorgho est très bonne, et supérieure à celle du mil dans les soixante premiers centimètres ; par contre, en dessous de quatre vingt centimètres, La colonisation du sol par le mil paraît nettement meilleure. En fin de cycle et en présence de labour, la densité racinaire du riz pluvial est plus élevée dans les horizons de surface que celle du mil et de L'arachide ; d'après des mesures récentes mais plus ponctuelles, on peut estimer que Les distances moyennes entre les racines sont inférieures à 1 cm dans Les vingt premiers centimètres de sol chez la variété 1 K P et dans les conditions qui viennent d'être définies. Entre 20 et 30 cm, Les distances moyennes entre les racines sont encore de 1,5 à 2 cm.

A partir des différents critères de caractérisation utilisés, on peut porter un jugement sur le degré de colonisation du profil par les racines.

Au cours du premier mois, ce sont les cultures de riz pluvial et d'arachide qui colonisent le plus rapidement les horizons superficiels du sol, grâce à leur densité de plantation plus élevée ; mais l'accroissement de la profondeur de sol colonisé par L'arachide est nettement supérieure à celle du riz. Dans le même temps, La colonisation des horizons de surface est plus faible chez le mil et le sorgho. Entre 15 et 30 jours, La profondeur du front racinaire du mil est beaucoup plus importante que celle du sorgho, et elle se rapproche progressivement de celle de L'arachide.

Pendant le second mois de végétation, on assiste à un accroissement général du degré de colonisation des horizons de surface, particulièrement chez le mil. et le sorgho. En dessous de 30 cm, la colonisation du sol est très différente d'une espèce à l'autre avec une évolution nettement plus rapide du front racinaire du mil et de l'arachide, et un arrêt presque complet de l'accroissement du front racinaire du riz pluvial.

Au début du troisième mois de végétation, c'est à dire à partir de l'épiaison, floraison des céréales et de la phase de formation et de maturation des gousses de l'arachide, lorsque des stress hydriques ont le plus d'incidence sur la rendement final., Les systèmes racinaires ont presque atteint leur développement maximum.

Les valeurs moyennes enregistrées pendant cette dernière phase du cycle montrent que Les horizons de surface sont très bien colonisés chez Les 4 espèces. Ce niveau de bonne colonisation du profil est limité au trente premiers centimètres pour Le riz et au soixante ou quatre vingt premiers centimètres pour Le sorgho. En dessous, les systèmes racinaires de L'arachide et surtout du mil colonisent nettement mieux le profil. En effet, les profondeurs maximales atteintes par les systèmes racinaires du riz pluvial et du sorgho sont respectivement de 40 à 55 cm et de 110 cm tandis que celle de l'arachide est de 150 cm et celle du mil est de 160 à 180 cm. ^{Pour cette espèce} la colonisation reste même très bonne en fin de cycle jusqu'à, La cote 140 cm. L'arachide et surtout le mil paraissent compenser leurs plus faibles masses totales des racines par une prospection nettement meilleure des horizons de profondeur.

Il apparait que ces différences importantes vont avoir des conséquences dans Les possibilités d'utilisation par la plante des réserves hydriques et minérales du sol, ce que nous allons examiner par La suite.

III. - EFFETS DU LABOUR SUR LA CROISSANCE RACINAIRE DES ESPECES ETUDIEES

L'étude des systèmes racinaires développés dans le sol avec et sans labour a permis d'étudier l'influence de la technique sur la croissance racinaire ; cet effet du travail du sol parait différent suivant les espèces,

ce qui pourra aussi avoir des conséquences agronomiques importantes, en particulier du point de vue de l'alimentation hydrique et minérale des cultures.

3.1. - Arachide

Sur arachide, Le labour a un Léger effet sur la croissance du pivot en profondeur pendant les cinquante premiers jours. A 50 jours, la profondeur maximale de l'enracinement passe ainsi de 130 cm sur le témoin à 145 cm sur labour mais cette différence disparaît ensuite.

L'influence sur le poids total des racines est peu marquée, sauf vers le trentième jour. En présence de labour, Le système racinaire entame c-a phase de croissance rapide plus tôt, mais comme celle-ci s'arrête aussi avant celle du témoin, Ces différences deviennent négligeables à partir de 50 jours.

Toute-fois, la répartition des racines dans Le profil paraît alors assez différente : en surface, jusqu'à 30 cm de profondeur, il n'y a pas ou peu d'écarts ; entre 30 et 50 cm, La densité racinaire paraît même supérieure sur Le témoin ; mais en dessous de 70 cm, Le système racinaire est mieux développé lorsqu'il y a eu un travail du sol.

Si l'on considère la Longueur totale des racines, on peut faire à peu près Les mêmes observations qu'avec Le paramètre poids sec, mais les différences témoin-labour semblent un peu plus sensibles. Entre Le trentième et Le quarantième jour, c'est à dire en pleine floraison, L'effet du Labour sur la Longueur totale peut aller jusqu'à 60 %. Au soixantième jour, elle n'est plus que de 17 % et devient négligeable en fin de cycle. Au total, Lorsque Le terrain a été labouré, La colonisation du sol par Les racines est toujours supérieure en profondeur (en dessous de 50 cm Le trentième jour et de 80 cm à partir du soixante cinquième jour), tandis qu'en surface, l'effet se fait seulement sentir dans La première moitié du cycle végétatif.

3.2. - 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 très supérieures en présence de labour pendant le tallage ; cette technique peut alors doubler Le poids et la longueur.

La vitesse de croissance est donc nettement plus rapide avec labour pendant cette période. A l'épiaison, les différences de longueur totale sont encore importantes (50 %) tandis que celles de poids sec sont légèrement plus faibles (40 %), par contre, à la récolte, les différences deviennent négligeables.

Du début du tallage jusqu'à l'épiaison, l'effet du labour sur le poids total des racines et sur la longueur totale se traduit par une meilleure colonisation de l'ensemble du profil de sol. Par contre, en fin de cycle, les différences sont devenues faibles dans les quatre vingt premiers centimètres de sol. En dessous de cette cote et jusqu'aux dernières racines, (150-180 cm), l'effet du labour est important, ce qui entraîne, dans ces horizons, une colonisation bien meilleure et donc des possibilités d'utilisation des réserves hydriques nettement améliorées.

3.3. - Sorgho

Il existe une influence du labour sur la vitesse d'avancement du front racinaire vers la profondeur ; celle-ci est toutefois assez limitée+ 20%. L'effet sur le poids total des racines est nettement plus marqué ; il est de 50 % environ à partir du tallage et, contrairement au mil, se maintient jusqu'à la fin du cycle. A ce stade, Le Labour améliore la densité racinaire dans tout le profil de sol colonisé,, mais comme chez le mil et l'arachide, ce sont surtout les horizons de profondeur qui connaissent les écarts les plus marqués (+ 120 % entre 60 et 100 cm)..

3.4. -- Riz pluvial

Le labour améliore nettement la vitesse d'avancement du front racinaire au cours du tallage, entre 15 et 32 jours., Celle-ci passe par exemple chez la variété I K P de 0,7 cm/jour sur le témoin à 1,5 cm/jour sur sol labouré. Les différences de profondeur d'enracinement sont donc: très marquées pendant

cette période. Ensuite, la progression du front devient extrêmement lente. Les écarts entre témoin et labour ont tendance à diminuer légèrement mais ils restent importants jusqu'à la fin du cycle ; ainsi, au stade grain Laiteux, l'effet du labour sur la profondeur du système racinaire est de + 50 % en moyenne sur les trois variétés étudiées.

Le labour augmente aussi nettement le poids total des racines. Les différences sont faibles en tout début de cycle, jusqu'au début du tallage ; elles augmentent ensuite très rapidement pendant le tallage et la montaison. A ce stade (65 jours), l'effet moyen du labour sur les 3 variétés étudiées est de + 160 %. Ensuite, la croissance pondérale du système racinaire se ralentit lorsque la plante est cultivée sur sol labouré, tandis qu'elle se poursuit jusqu'à la récolte sur Le témoin. Toutefois, à ce dernier stade, les différences sont encore très marquées (+ 60 %) .

Le labour augmente nettement la masse totale du système racinaire et sa profondeur maximale ; il améliore aussi La répartition de celui-ci dans le profil. de sol colonisé. Ainsi, au stade montaison, on trouve encore 18 % du poids total du système racinaire dans l'horizon 20-30 cm lorsque Le sol a été labouré, tandis qu'il n'y en a plus que 8 % sur le témoin.

Chez cette espèce, dont le système racinaire reste toujours superficiel,, le labour a un effet spectaculaire sur la colonisation du sol par les racines.

Le labour a donc un effet favorable sur chacun des systèmes racinaires étudiés; il améliore en particulier la vitesse de croissance en début de cycle, et la colonisation du sol en profondeur.

IL existe cependant des différences entre les cultures. Ainsi, la vitesse de progression du front racinaire n'est pas modifiée chez le mil et assez peu chez le sorgho. Par ailleurs, l'effet du labour sur La masse totale des racines devient négligeable en fin de cycle chez le mil et l'arachide ; on ne trouve alors des différences qu'en profondeur en dessous d'un mètre. Chez le sorgho et le riz, l'effet du labour se maintient au contraire jusqu'à la récolte.

Il faut attribuer cet effet à une amélioration de la porosité du sol et à une réduction de la résistance mécanique du sol à la pénétration des racines, car ce sont les deux propriétés physiques du sol qui sont les plus modifiées par le labour (CHARREAU et NICOU, 1971 ; NICOU, 1977). Dans les sols sableux mal structurés du Sénégal, des relations ont d'ailleurs été trouvées entre la porosité du sol en début de cycle et la densité racinaire (NICOU et THIROUIN, 1968 ; NICOU, 1974), ainsi qu'entre la résistance mécanique du sol et la densité racinaire (CHOPART, 1980).

IV. - CONSEQUENCES ET APPLICATIONS AGRONOMIQUES

La colonisation du sol par les systèmes racinaires et la production totale de racines sont très différentes d'une espèce à l'autre et le travail du sol a une influence variable mais généralement marquée. Nous allons examiner les conséquences que cela peut avoir au Sénégal sur les possibilités d'alimentation hydrique et minérale de la plante, sur le rôle du travail du sol et sur le bilan organique.

4.1. -- Influence de l'enracinement sur les possibilités d'alimentation hydrique et minérale et adaptation des systèmes racinaires des espèces étudiées à l'utilisation de l'eau et des éléments nutritifs du sol

4.1.1. - Définition d'un profil racinaire idéal pour l'alimentation hydrique et minérale des cultures pluviales au Sénégal

Nous avons décrit dans la première partie, le rôle que jouent les racines dans les processus d'alimentation hydrique et minérale de la plante, ce qui nous a permis de souligner la nécessité d'un développement suffisant des systèmes racinaires, surtout lorsque le niveau de richesse chimique du sol est faible et la pluviométrie irrégulière, comme c'est le cas au Sénégal. Dans ce pays, en conditions de culture de plein champ, deux caractéristiques du système racinaire paraissent conditionner 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 zone 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 ; celui-ci représente la quantité potentielle de l'eau pouvant être mise à la disposition de la plante pendant un intervalle entre deux pluies.

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 ces racines (MAERTENS et coll., 1974). En effet, ces auteurs ont montré que, lorsque le sol est bien colonisé par les racines, celles-ci pouvaient utiliser les réserves jusqu'à une humidité faible correspondant à de l'eau fortement retenue par le sol, tandis que, lorsque le sol est moins bien colonisé (horizons plus profonds, espèces à enracinement moins bien développé), les profils d'assèchement maximum correspondent à des humidités nettement plus élevées.

Par ailleurs, une expérience menée sur riz pluvial en lysimètres nous a permis de montrer que, lorsque seul un tiers du système racinaire total se trouve dans une couche de sol humide pourtant constamment réapprovisionnée, celui-ci ne parvient pas à subvenir aux besoins en eau de la plante (CHOPART et NICOU, 1976).

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 (déterminées par la profondeur maximale atteinte par les dernières racines à un moment donné).

Or, en conditions de culture dépendant uniquement d'une pluviométrie irrégulière, les couches les plus superficielles vont être souvent plus ou moins desséchées par l'évaporation ainsi que par la consommation de la culture (et celle des adventices). Les racines devront donc puiser l'eau nécessaire dans les couches plus profondes.

Ces considérations nous amènent à conclure que, dans les sols sableux du Sénégal (filtrants et à faibles réserves d'eau utile par volume de SOL, mais profonds), le système racinaire idéal pour assurer l'alimentation hydrique de La plante doit posséder Les caractéristiques suivantes :

- grande profondeur,
- très bonne colonisation du sol par les racines, répartie régulièrement sur tout le prof i l.

En ce qui concerne l'alimentation minérale, il faut tenir compte du fait que la richesse du sol en 'éléments nutritifs, est plus importante en surface, surtout en terrain fertilisé. Toutefois, dans les sols du Sénégal, dont le profil. pédologique est généralement: assez peu différencié, les teneurs en éléments nutritifs sont faibles en profondeur, mais non nulles.

Les nitrates, comme nous l'avons vu, accompagnent les flux hydriques pour parvenir aux racines ; le profil racinaire idéal correspond donc à celui de l'eau. Une bonne colonisation en profondeur est d'ailleurs particulièrement importante,, car ceux-ci sont rapidement entraînés par les flux hydriques verticaux dans les couches plus profondes ; les racines doivent donc: pouvoir les intercepter à différents niveaux dans le sol.

Le phosphore et le potassium migrent vers les racines, par diffusion et mass flow, sur des distances réduites (de l'ordre du millimètre pour Le phosphore et du centimètre pour le potassium). On observe que, dans une couche de sol bien colonisée par les racines, le volume de sol pouvant réellement participer à l'alimentation de la plante en phosphore est faible. Si, par exemple, les distances moyennes entre racines sont de 1 cm, le volume de sol pouvant réellement participer à L'alimentation en phosphore représente moins de 4 % du volume total (calculs réalisés avec un diamètre moyen des racines de 0,2 mm).

En culture de plein champ, le volume de sol pouvant participer à l'alimentation en phosphore est toujours inférieur au volume total. Toutes conditions étant égales par ailleurs, il est directement proportionnel à la longueur des racines..

Pour Le potassium, ce n'est que lorsque les distances moyennes entre tes racines dépassent 2 cm que le volume de sol pouvant participer à l'alimentation sera inférieur au volume total, mais nous avons vu que c'était souvent le cas chez les plantes étudiées, surtout pendant la première moitié du cycle.

Pour assurer une bonne alimentation de la plante en phosphore et aussi en potassium, le système racinaire devra donc coloniser rapidement le profit de sol dans les horizons Les mieux pourvus en ces éléments, c'est à dire généralement dans Les horizons de surface. Ceci correspond donc à une répartition 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 p luviale au Sénégal 1, les horizons de surface se trouvent souvent à des humidités faibles dans les intervalles entre deux 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 donc celui défini pour l'alimentation hydrique, c'est à dire :

- 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 en surface qu'en profondeur.

Par a-i l leurs, la masse totale de matière sèche ainsi produite ne doit quand même pas être trop importante pour ne pas concurrencer La production des parties aériennes. A cet égard, des racines de faible diamètre sont, pour un même poids, beaucoup plus intéressantes que des racines plus grosses. Elles le sont, du point de vue de la prospection du milieu et du volume de sol pouvant réellement participer à l'alimentation hydrique de la plante qui, comme nous l'avons vu, dépend de la Longueur des racines et des distances les séparant. Elles le sont aussi du point de vue de L'absorption proprement dite, qui dépend

plus particulièrement de la surface d'absorption (surface développée des racines). En effet, pour un même volume de racines, cette surface est plus grande lorsque le diamètre est plus fin.

4.1.2. Adaptation des systèmes racinaires étudiés à l'utilisation de l'eau et des éléments nutritifs du sol

Le profil racinaire ^{idéal} ayant ainsi été défini, il reste à voir dans quelle mesure les systèmes racinaires des espèces étudiées se rapprochent de celui-ci.

4.1.2.1. Utilisation de l'eau

L'évolution des besoins en eau des différentes plantes au cours de leur cycle est assez bien connue à la suite de travaux de DANCETTE (1977-1979).

Tableau n° 23 : Evolution de l'ETM moyen en mm/jour sur arachide, mil et riz pluvial (d'après DANCETTE, 1977-1979)

Nombre de jours après le semis	0 - 20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120
Arachide (Bambey)	3	4	5	5	4	
Mil (Bambey)	2	5	6	5	4	
Riz pluvial (Casamance)	2	3,5	6	5	3,5	3,5

Il s'agit toutefois des besoins en eau maxima, en conditions d'alimentation hydrique non limitante, avec éventuellement irrigation de complément. En début de cycle, et surtout pour les plantes à grands écartements, Les valeurs mesurées comprennent une forte proportion d'évaporation sol nu, et peuvent être réduites sans trop de dommage pour la plante. Il n'en est pas de même aux stades épiaison, floraison, remplissage des grains de céréales et formation-remplissage des gousses d'arachide où une réduction de plus de 20 % de ces besoins en eau a une grave incidence sur le rendement final.

Arachide

Grâce à la progression rapide de son pivot et à une colonisation précoce des horizons de surface, l'arachide paraît assez bien adaptée à l'utilisation des réserves hydriques du sol pendant la première moitié du cycle. Entre le quarantième et le soixantième jour, lorsque les besoins en eau sont les plus importants et qu'un stress hydrique peut être le plus dommageable, le système racinaire colonise bien le sol sur 80 à 100 cm. La réserve d'eau utile est donc de 70 mm environ, en sol sableux de Bambey. Si l'on part d'un profit à la capacité de rétention, cela lui permet donc de végéter pendant deux semaines sans pluie grâce aux réserves comprises entre 0 et 100 cm. En dessous d'un mètre, bien que la profondeur de l'enracinement atteigne 150 cm, l'utilisation de l'eau est faible, même en cas d'épuisement des réserves de surface, et surtout en absence de travail du sol (CHOPART, NICOU et VACHAUD, 1979).

Chez cette espèce, il y aurait donc un intérêt à améliorer/ par la sélection, la colonisation du sol entre 100 et 150 cm, et aussi à retarder l'arrêt précoce de la croissance du pivot.

Mil

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

Lorsque les besoins en eau deviennent 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. À partir du cinquantième jour, c'est à dire, à l'approche de l'épiaison et au début de la phase la plus sensible au manque d'eau, le système racinaire colonise bien le sol sur un mètre de profondeur, au moins lorsque le sol a été labouré ; en effet, à ce stade, l'effet du labour est encore très marqué. Au début de l'épiaison, le profil racinaire du mil paraît donc, comme l'arachide, assez bien adapté à l'utilisation des réserves dans le premier mètre de sol, lorsque le terrain a été labouré.

Le front racinaire va ensuite continuer à progresser jusqu'à la fin du cycle pour atteindre 780 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.

En fin de cycle, le mil paraît donc se rapprocher du profil idéal ; il serait néanmoins souhaitable d'augmenter la vitesse de croissance en début de cycle et la colonisation du sol en profondeur au début de la phase de plus grande sensibilité à la sécheresse.

Sorgho

Nous ne disposons pas de données fiables sur les besoins en eau du sorgho ; il est probable qu'ils sont du même ordre de grandeur que ceux du mil pendant les trois mois du cycle de ce dernier.

Le système racinaire est nettement plus superficiel que celui du mil, surtout en absence de travail du sol. Même en fin de cycle, la profondeur de sol colonisée ne dépasse pas 110 cm pour le sorgho à pailles courtes et 130 cm pour le sorgho à pailles hautes et à très long cycle. Par contre, dans les trente à quarante premiers centimètres, la colonisation est très intense ; le système racinaire du sorgho est donc beaucoup moins apte que celui du mil à utiliser l'eau des couches profondes du sol, ce qui peut expliquer en partie sa préférence pour des sols plus argileux dont les réserves utiles sont plus importantes, et sa mauvaise adaptation aux sols sableux (dior) des zones de cultures du mil. Il serait très intéressant d'augmenter la profondeur de sol colonisée. Il faudrait surtout que les variétés, nouvelles, plus performantes du point de vue potentiel de rendement, de cycle plus court et à meilleur rapport grains/pailles n'aient pas, par ailleurs, des systèmes racinaires moins bien développés que les variétés actuelles ; ce qui semble être le cas de la variété améliorée demi-naine de sorgho (63-18) par rapport à la variété plus traditionnelle à hautes tiges (congossane).

Riz pluvial

Le système racinaire du riz pluvial prospecte assez rapidement les trente premiers centimètres du sol ; les possibilités d'alimentation hydrique sont donc relativement bonnes en début de cycle. Ainsi, sur sol beige, il dispose

d'une réserve en eau utilisable de 40 mm environ sur 30 cm de sol, ce qui devrait théoriquement lui permettre de supporter un intervalle de 10 jours entre deux pluies. En fait, c'est loin d'être le cas, car la réserve en eau facilement utilisable est nettement plus faible que la réserve en eau utile. Ensuite, lorsque les besoins en eau s'élevaient, la profondeur de sol colonisée et donc les réserves n'augmentent que très faiblement ; la plante est extrêmement dépendante d'un approvisionnement régulier en eau, particulièrement aux stades épiaison et floraison. Un arrêt des pluies de quelques jours peut alors avoir pour conséquence une réduction importante du rendement.

Du fait de son système racinaire très superficiel, le riz pluvial paraît être parmi les espèces étudiées, celle qui peut tirer le plus de bénéfice d'une amélioration de la colonisation du sol, par les racines. L'effet du Labour est spectaculaire dans le milieu physique sénégalais, et cette technique paraît indispensable au bon développement de la plante. Des études sont aussi entreprises, surtout en Côte d'Ivoire, en ce qui concerne l'amélioration, par voie génétique, du système racinaire et de la tolérance à la sécheresse.

4.1.2.2. - Utilisation des éléments nutritifs

Au Sénégal, l'évolution des besoins des plantes en éléments minéraux au cours du cycle est mal connue ; on dispose surtout des valeurs de mobilisations totales à la récolte.

De même, l'adaptation des systèmes racinaires à l'utilisation des éléments minéraux est difficile à définir, car les phénomènes sont complexes et leur étude n'a pas encore été abordée au champ.

On peut toutefois remarquer que les systèmes racinaires du sorgho et du riz pluvial dont la colonisation est très intense en surface pendant la seconde moitié du cycle, doivent permettre à la plante de très bien utiliser les réserves dans les vingt premiers centimètres de sol.

Le mil et l'arachide colonisent moins bien la couche superficielle plus riche ; ils sont par contre mieux adaptés à l'utilisation des éléments minéraux en profondeur, en cas d'assèchement du profil en surface.

En ce qui concerne le riz pluvial, dont l'enracinement est très superficiel et dont les besoins en eau totaux sont nettement inférieurs à la

pluviométrie, il y a un risque élevé de lixiviation des éléments fertilisants mobiliers en dessous de la zone d'extension racinaire. Il est donc préférable, après un précédent riz pluvial, de cultiver de l'arachide ou du mil qui pourront utiliser une partie de ces éléments entraînés en profondeur.

4.2. - Effets agronomiques du travail du sol

Dans les sols sableux du Sénégal, mal structurés et à faible porosité, de nombreux auteurs ont mis en évidence un effet favorable du labour sur le rendement des cultures. Les premières études ont été menées par TOURTE (1951), mais c'est NICOU qui a réalisé les travaux les plus nombreux et les plus complets dans ce domaine. Cet auteur a réalisé une synthèse de l'ensemble des résultats disponibles (NICOU, 1977), d'où nous avons tiré les effets moyens du labour dans les sols exondés du Sénégal (labour sans enfouissement de matière organique) :

-- Mil	+ 19 %
-- Arachide	+ 24 %
-- Sorgho	+ 24 %
-- Riz pluvial	+103 %

Les Labours sont, en général, réalisés en traction bovine, avec des petites charrues qui travaillent entre 15 et 20 cm de profondeur.

Des travaux du sol plus superficiels réalisés avec des instruments à dents ont des effets beaucoup plus réduits (NICOU, 1977).

Le labour modifie certaines propriétés du sol ce qui peut en partie expliquer ces plus-values :

Economie de l'eau

Le Labour, en augmentant la rugosité du sol et sa porosité, améliore les capacités d'infiltration de l'eau et réduit donc le ruissellement au moins en début de saison des pluies. Cela a pu être vérifié grâce à des profils hydriques sur sol nu après les premières pluies (CHOPART, 1975) et grâce à des mesures de ruissellement dans des dispositifs prévus à cet effet (CHARREAU, 1969).

D'autre part, le labour, Lorsqu'il est réalisé en fin de saison des pluies (labour de fin de cycle), a pour effet de détruire très efficacement les adventices et de provoquer un assèchement rapide de La couche de sol travaillée ; celle-ci sert alors de "mulch terreux" et protège de l'évaporation les réserves hydriques résiduelles stockées dans tes couches de sol plus profondes.

En fin de saison sèche, des différences de stocks d'eau de plusieurs dizaines de millimètres sont généralement observées entre un sol témoin et un traitement labour de fin de cycle ce qui, en cas de sécheresse, peut avoir un effet très favorable sur la culture suivante (NICOU et CHOPART, 1977 ; CHOPART et colt,, 1979).

Activité biologique

En augmentant l'aération du sol, le labour améliore L'activité symbiotique des Légumineuses ; celle-ci commence en particulier plus tôt (WEY et OBATON, 1978). D'autre part, la minéralisation de L'azote organique est plus active (NICOU, 1977).

Utilisation des réserves hydriques et minérales

Nos résultats démontrent que le labour a un effet très marqué sur la croissance des systèmes racinaires. Cette technique améliore en particulier Leur vitesse de croissance en début de cycle et la colonisation du sol en profondeur ; elle permet ainsi aux systèmes racinaires de se rapprocher du profil idéal défini précédemment.

L'effet du labour s'explique donc, aussi et surtout, par une amélioration des possibilités d'alimentation hydrique et minérale. En ce qui concerne l'eau, on dispose d'ailleurs de résultats montrant une meilleure utilisation des réserves profondes en cas d'assèchement des horizons superficiels ; ces résultats concernent chacune des espèces étudiées, arachide (CHOPART, NICOU et VACHAUD, 1979), mil (CHOPART et NICOU, 1976), sorgho (CHOPART, 1970), riz pluvial (NICOU, SEGUY et HADDAD, 1970 ; CHOPART et NICOU, 1976).

Les résultats présentés dans cette étude quantitative de la morphologie et de la croissance racinaire des plantes avec et sans labour, permettent de mieux comprendre le rôle de cette technique dans les conditions de sol

sableux et sablo-argileux, et son intérêt agronomique pour améliorer l'utilisation des réserves hydriques et minérales du sol. Bien sûr, en augmentant le développement des parties végétatives, le labour augmente aussi les besoins, mais cette augmentation des besoins paraît moins que proportionnelle à l'augmentation de la végétation (CHOPART, NICOU et VACHAUD, 1979).

Cette technique pose cependant les problèmes de vulgarisation en milieu rural (NICOU, 1974 ; CHOPART, 1978) et des solutions de remplacement sont actuellement envisagées. Il convient cependant de bien vérifier que les nouvelles techniques culturales ne conduisent pas à une réduction des effets sur les systèmes racinaires, comme c'est le cas par exemple des techniques de paillage du sol avec travail minimum de celui-ci (CHOPART et coll., 1979).

Par ailleurs, lorsque l'agriculteur ne peut labourer qu'une partie de son exploitation et qu'il doit donc faire un choix, le labour devra se faire avant le riz pluvial, si cette culture est présente dans la rotation.

4.3. - Apport au sol de matière organique

Après la récolte des parties aériennes, la masse de matière organique provenant des systèmes racinaires qui t-lestent dans le sol. est de 350 à 400 kg/ha pour le mil et l'arachide, de 800 à 1000 kg/ha pour le sorgho et de 800 à 1200 kg/ha de matière sèche pour le riz pluvial.

Il s'agit là des valeurs de masse racinaire mesurées en fin de cycle. Les valeurs réelles d'apport de matière organique peuvent être légèrement supérieures, par suite de la dégradation d'une partie du système racinaire en cours de végétation; mais, chez les espèces annuelles à cycle court, les différences doivent être peu importantes. L'existence d'exudats racinaires, dont l'étude n'a pas été abordée, peut aussi augmenter l'apport de matière organique.

Cette matière organique en provenance des racines est très intimement liée au sol. Les quantités sont faibles, mais non négligeables, et elles sont apportées régulièrement après chaque culture.

Le riz pluvial paraît à cet égard plus intéressant que le mil ou l'arachide. La masse des racines de sorgho laissées dans le sol. est aussi appréciable ; mais celles-ci libèrent en fin de cycle, et après la récolte, des composés toxiques qui ont un effet défavorable sur la culture suivante (CHOPART et NICOU, 1974 ; NICOU, 1976 ; BURGOS LEON et coll., 1977).

Dans des terrains pauvres et dans lesquels on n'apporte souvent aucune autre forme d'enrichissement organique, cela peut avoir une certaine incidence sur le statut organique du sol qu'il serait intéressant de préciser.

La vitesse et le mode d'évolution des matières organiques dans le sol (coefficients isohumiques) n'ont pas été déterminés avec précision dans le milieu où nous avons travaillé. On sait seulement que cette évolution est rapide et qu'elle est orientée essentiellement vers la minéralisation. Ainsi, dès le début de la culture suivante, les racines ont presque complètement disparu dans le profil cultural.

Le labour, en améliorant l'activité biologique du sol, accélère la vitesse de minéralisation de la matière organique. Dans le cas de rotations faisant entrer le sorgho et le riz pluvial, cela peut être en partie compensé par l'effet du labour sur l'augmentation de la production des racines. Par contre, dans les zones de cultures du mil et de l'arachide (sols les plus sableux), cet effet du labour sur la masse totale des racines en fin de cycle est très faible. Dans ces sols, il est donc encore plus nécessaire qu'ailleurs d'associer un apport complémentaire de matière organique à la technique du labour.

CONCLUSION GENERALE

Les techniques de prélèvement et de Caractérisation d'échantillons de racines que nous avons utilisées ont permis d'avoir une meilleure connaissance des systèmes racinaires des principales cultures au Sénégal. Certains paramètres ont été mesurés sur chacune des espèces : le poids de matière sèche, la profondeur du front racinaire, la répartition des racines dans le profil. D'autres ont pu être caractérisés en cours d'étude, par l'adaptation de techniques de mesure (longueur totale - distances moyennes entre les racines et diamètre moyen des racines) ou par la mise au point d'une méthode (écart type des populations de diamètre). Ce dernier paramètre, associé au diamètre moyen, donne des indications intéressantes sur le degré de ramification des racines. Grâce à ces nouveaux critères, Les systèmes racinaires du mi 1 et de l'arachide, les deux espèces les plus cultivées, ont pu être caractérisés encore plus finement.

L'étude quantitative de la croissance et de La morphologie des systèmes racinaires de chacune des espèces a permis de faire ressortir des différences très importantes, en particulier en ce qui concerne la vitesse de croissance, La profondeur de sol colonisé et le degré de colonisation de celui-ci.

On peut ainsi mieux déterminer les possibilités d'utilisation des réserves hydriques et minérales du sol par chacune des espèces, en fonction du stade de végétation. Dans les sols profonds, ceci permet d'évaluer avec plus de précision les réserves d'eau utile qui dépendent du développement des systèmes racinaires, et donc de calculer, ou de simuler, le bilan hydrique dans de meilleures conditions.

Les résultats obtenus concernant la colonisation par les racines des différents horizons du sol avec les critères : longueur totale, distances moyennes entre les racines, diamètre moyen, surface de contact sol racines (en combinant longueur et diamètre) peuvent aussi permettre d'évaluer le volume de sol rtiellement utilisable pour chacun des principaux éléments nutritifs, en tenant compte des distances de migration propres à chacun d'eux.

Les modalités de l'utilisation de l'eau et des éléments minéraux par Les plantes cultivées en plein champ, et en particulier le rôle des systèmes racinaires dans ce domaine (extraction racinaire) n'ont pas encore été suffisamment étudiés au Sénégal. L'une des raisons principales en était le manque d'informations précises sur le développement des systèmes racinaires. Ces études paraissent pourtant très importantes pour arriver à une utilisation optimale des faibles disponibilités en eau et en éléments minéraux, en améliorant Leur efficacité et en limitant Les pertes, par évaporation ou percolation de L'eau, et par lixiviation des éléments minéraux.

Ce thème va maintenant être abordé sous forme de recherches pluridisciplinaires sur une même expérimentation, et les acquis en matière de croissance des systèmes racinaires, et de méthodes de caractérisation d'échantillons de racines seront très utiles.

Les résultats présentés concernent des conditions de cultures pluviales. Pour les mêmes espèces et dans les mêmes sols, ils peuvent aussi être appliqués à La culture sous irrigation par aspersion, qui commence à apparaître au Sénégal. En culture irriguée, L'efficacité de l'eau doit être la meilleure possible pour rentabiliser La technique, et les doses d'irrigation devraient tenir compte du volume de sot bien colonisé par les racines.

En fin de cycle, la connaissance du poids total de matière sèche des racines par unité de surface cultivée nous donne une idée plus précise de l'apport de matière organique au sol que représentent les organes souterrains. Cet apport annuel, différent suivant les espèces, est faible, mais il pourrait avoir une certaine influence sur le bilan organique en absence de toute autre restitution régulière.

Pour l'arachide, le mil, le sorgho et le riz pluvial,, il reste encore à étudier plus complètement Les variations des systèmes racinaires en fonction du type de milieu et de certaines conditions comme l'humidité et le pH (toxicité aluminique). IL faut aussi préciser les différences variétales, particulièrement dans le cas du riz pluvial, car, pour cette culture, il existe maintenant de nouvelles variétés. II reste enfin à aborder l'étude d'autres espèces cultivées au Sénégal : le soja, Le maïs et le niébé. Certaines caractéristiques du système racinaire du cotonnier sont déjà étudiées par un agronome

plus particulièrement spécialisé dans cette culture,. Ces travaux à compléter ou à entreprendre pourront bénéficier de l'acquis méthodologique.

Les méthodes de prélèvement qui ont été employées peuvent être considérées comme des techniques de référence, mais elles sont très lourdes et perturbent le sol. Nous prévoyons de comparer les résultats ainsi obtenus et ceux provenant de méthodes plus légères (injection de phosphore radioactif ou carottages verticaux de faibles volumes de sol). IL reste à mettre au point les modalités exactes de réalisation pour les différentes plantes, sauf Le riz pluvial, pour lequel la technique d'injection du ^{32}P est déjà au point grâce aux travaux réalisés par l'IRAT et l'ORSTOM en Côte d'Ivoire.

Si, après comparaison avec les méthodes de référence, les résultats obtenus sont assez précis, on pourra ainsi déterminer certaines caractéristiques des systèmes racinaires sur des dispositifs expérimentaux qui n'autorisent pas de perturbation du milieu.

Les études des systèmes racinaires des principales plantes cultivées sous pluies au Sénégal. ont déjà fait l'objet d'applications agronomiques. Celles-ci devraient être encore plus nombreuses dans un proche avenir ; notamment en ce qui concerne Les modalités de l'alimentation hydrique et minérale des plantes au champ, et le choix de techniques culturales assurant une meilleure adaptation des cultures au milieu. Elles pourront ainsi apporter leur contribution à la nécessaire augmentation de la productivité de l'agriculture sénégalaise.

B I B L I O G R A P H I E

- ABDELLATIF, NOUR M., WEIBEL D. E., 1976 - Evaluation of root characteristics in grain sorghum. Agron. J., 70, 217-218.
- ADAMS F., et PEARSON R. W., 1970 - Differential response of cotton and peanut to subsoil acidity. Agron. J., 62, 9-12.
- ANDERSON W. E., 1975 - Ion transport through Roots. In "the development and fonctions of roots". Academic press London, 437-463, edit by J.G. TORREY and D. T. CLARKSON.
- ANDREW C. S., JOHNSON A. D. et SANDLAND R. L., 1973 - Effect of aluminium on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pastures legumes. Aust. J. Agric., 24, 325-331
- PRTSCHWAGER E., 1948 - Anatomy and morphology of the vegetative organs of sorghum vulgare. USDA. Tech. Bull., 957-965.
- EALDY, 1973 - Progres recents concernant l'étude du système racinaire du blé (triticum sp). Ann. agron., 24, 241-276
- BARBER S. A., 1974 - Influence of the plant root in ion movements in soil. In "the plant root and its environment, 525-564. E. W. CARSON ed. Charlottes ville U. S. A.
- BARLEY K. P., 1970 - The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. Adv. Agron., 22, 159-301.
- BARLEY K. P. et GREACEN E. L., 1967 - Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of root and underground shoots. Adv. Agron., 19.
- BEGG J. E., 1965 - The growth and development of a crop of bulrush millet (pennisetum typhoides). J. agric. Sci. V. K., 65, 341-349.
- 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 hight solar radiation. Agric. Meteorol., 1294-1312.
- BERNSTEIN L. et NIEMAN R. D., 1960 - Apparent free space of plant roots. Plant. Physiol., 35, 589-598.
- BLANCHET R., 1968 - La nutrition des plantes. Bull. tech. Inf., 231, 8-13

- BLANCHET R., CHAIJMONT COLETTE et STUDER R., 1962 - Alimentation des plantes et phénomènes de contact racines-particules de sol. Ann. agron., 13, 21-29.
- BLANCHET R. et BOSCH M., 1969 - Réactions d'échanges et principaux facteurs de l'alimentation potassique des plantes dans deux sols de textures différentes. Ann. agron., 18, 601-621.
- BLANCHET R., BOSCH M. et MAERTENS C., 1969 - Some interactions of cation nutrition and the water supply of plants. "In transition from extensive to intensive agriculture with fertilizers", ed. inst. int. potasse, Berne, 121-131.
- BLANCHET R., BOSCH M., MAERTENS C. et PUECH J., 1974 - Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par Les cultures. II) Influence de l'humidité du sol et des flux hydriques sur l'absorption des éléments minéraux par Les racines. Ann. agron., 25, 681-696.
- BLANCHET R., MAERTENS C. et BOSCH M., 1974 - Principaux facteurs agronomiques déterminant l'absorption des éléments nutritifs par Les racines. BULL. Assoc. fr. Etude Sci., 2, 69-79.
- BLONDEL D., 1965 - Premiers résultats sur l'influence de la densité apparente du sol sur la croissance racinaire de l'arachide et du sorgho. Ses conséquences sur les rendements. COLL. sur la cons. et l'amél. de la fert. des sols, Khartoum OUA/STR4, comm. 37, 173-181.
- BLONDEL D., 1970 - Relation entre le nanisme jaune de l'arachide en sol sableux et le pH. Définition d'un seuil pour l'activité du rhizobium. Agron. trop., 25, 585-595.
- BLUE W.G. et DANTZMAN C.L., 1977 - Soil chemistry and root development in acid soils. Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc., 36, 9-15.
- BLUM A., ARKIN C.F. et JORDAN W.R., 1977 - Sorghum root morphogenesis and growth. I effect of maturity genes. II manifestation of heterosis. Crop Sci., 17, 149-153, 153-157.
- BOIS J.F. et BONNIN E., 1979 - Utilisation de traceurs radioactifs pour l'étude de l'enracinement du riz pluvial. Doc. mult. Centre ORSTOM Adiopodourné Côte d'Ivoire, 68 p.
- BOLE J.B., 1973 - Influence des poils radiculaires sur la fourniture de P du sol du blé. Can. J. Soil. Sci., 53, 169-175.
- BONFILS P. et FAIJRE J., 1955 - Etude comparative des sols du CNRA de Bambey. Ann. cent. natl. rech. agron. Bambey Sénégal, 15, 5-24.
- BONZON B. et PICARD D., 1969 - Matériels et méthodes mis en oeuvre sur le centre ORSTOM d'Adiopodourné pour l'étude de la croissance et du développement en pleine terre des systèmes racinaires. Cah. ORSTOM sér. Biol., 9, 3-18.
- BONZON B., 1964 - Description et mode d'utilisation d'un appareil de mesure photoélectrique des surfaces végétates. Fruits, 19, 577-581.
- BOSCH M., 1975 - Dynamique de l'alimentation phospho-potassique. Rev. Purpan, 97, 297-307.

- BOJSC M. et BLANCHET R., 1972 - Influence de la capacité d'échange des cations du sol sur les mouvements d'ions K^+ assurant l'alimentation potassique des plantes. CR Acad. Sci., Sér. D : sci. nat., 274, 1900-1903.
- BRIGGS L. J. et SHANTZ H. L., 1912 - The relative wilting coefficient for different plants. Bot. Gaz., 53, 229-235.
- BJI HUU TRI et MONNIER G., 1973 - Etude quantitative de la granulation des sols sous prairie de graminées. Ann. agron., 4, 401-424.
- BJR R., MORARD P. et BERDUCOU J., 1974 - Etude morphologique du système racinaire du sorgho (sorghum dochna) : sa structure, son développement. Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse, 110, 74-81
- BUR R., MORARD P. et BERDUCOU J., 1977 - Importance des racines séminales et adventives pour la croissance et la nutrition cationique du sorgho-grain (sorghum dochna). Plant Soit, 47, 1-12.
- BURGOS LEON W., NICOU R., CHOPART J.L. et DELAFOND G., 1978 - Résumé des recherches sur l'allélopathie induite par la culture de sorgho au Sénégal. Doc. mult. ISRA CNRA Bambey Sénégal, 12 p.
- BURSTRLJM H., 1952 - Studies on growth and metabolism of roots. Calcium as a factor of growth. Physiol. Plant, 5, 39-49.
- BUSSCHER W. J. et FRITTON D. D., 1978 - Simulated flow through the root xylem. Soil Sci. Soc. Am., 42, 2 - 6 .
- CHAMPAGNAT P., OZENDA P. et BAILLAUD L., 1969 - Biologie végétale III croissance, morphogenèse, reproduction. Ed. Masson et Cie, PARIS, 510 p.
- CHAMPION R. A. et BARLEY K. P., 1969 - Penetration of clay by root hairs. Soil Sci., 108, 402-407.
- CHARREAU C., 1969 - Influence des techniques culturales sur Le développement de L'érosion et du ruissellement en Casamance. Agron. trop., 24, 836-842.
- CHARREAU C. et NICOU R., 1971 - L'amélioration du profil culturat dans Les sols sableux et sablo-argileux de La zone tropicale sèche ouest africaine et ses incidences agronomiques. Agron. trop., 26, 209-225, 531-565, 903-978, 1183-1247.
- CHETTERJEE R. K. et RATTAN LAL, 1968 - Growth and yield of maize, influenced by soil and physical conditions. Indian J. Agric. Sci., 35.
- CHOPART J. L., 1970 - Morphologie et croissance de l'enracinement du sorgho (sorghum vulgare) en deux conditions de fertilité. Doc. mult. IRAT Sénégal, 97 p.
- CHOPART J. L., 1975 - Influence du labour et de la localisation de l'engrais en profondeur sur l'adaptation à la sécheresse de différentes cultures pluviales au Sénégal. Doc. mult. ISRA CNRA Bambey Sénégal, 172 p.
- 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.

- CHOPART J.L., 1978 - Prolongation de la période des labours de fin de cycle grâce à des techniques d'économie de l'eau. Application aux sols sableux (dior) de La zone centre nord du Sénégal. Doc. mult. ISRA CNRA Bambey Sénégal,, 64 p.
- CHOPART J.L., 1980 - Relations entre la résistance mécanique du sol à La pénétration et le développement racinaire du mil cultivé en conditions naturelles, Doc. mult. ISRA CNRA Bamhey Sénégal (à paraître).
- CHOPART J.L., MAI BOUSSIN J.C. et NICOU R., 1970 - Effets du labour sur quelques caractéristiques de l'arachide en 1970. Doc. mult. IRAT CNRA Bambey Sénégal,, 9 p.
- CHOPART J.L. et IVICOU R., 1973 - Effets dépressifs de cultures répétées de sorgho dans les sols sableux du Sénégal. Premiers essais d'explication. African soil 17, 181-188.
- CHOPART J.L. et NICOU R., 1976 - Influence du labour sur le développement radicaire de différentes plantes cultivées au Sénégal - conséquences sur leur alimentation hydrique. Agron. trop., 20, 7-28.
- CHOPART J.L., NICOU R. et VACHAUD G., 1979 -- Le travail du sol et le mulch paillés - influences comparées sur l'économie de l'eau dans le système arachide-mil au Sénégal. In "Isotopes and radiation in research on soil plant relationships". International atomic energy agency. ed.Vienna, 199-211.
- CLURE Mc W. et HARVEY C., 1962 - Use of Radiophosphorus in mesuring root growth of sorghum. Agron. J., 54, 457-459.
- COWAN I.R., 1965 - Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. Appl. écol., 221-239.
- CRAIG, 1968 - Selection for root strength in maize. Trop. Agric., 45, 343-345.
- DANCETTE C., 1973 - Les besoins en eau des plantes de grande culture au Sénégal. In "C.R. Symp. IAEA FAO I-5-10-73. Isotope and radiation technique in soil physics and irrigation studies", 351-371,
- DANCETTE C., 1975 - Carte d'adaptation à la saison des pluies des mils à cycle court dans la moitié nord du Sénégal. Doc. mult. ISRA CNRA Bambey, Sénégal, 18 p.
- DANCETTE C., 1976 - Mesures d'évaporation potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau Libre au Sénégal. Agron. trop., 31, 321-338.
- DANCETTE C., 1977 - Besoins hydriques des cultures pluviales et politique agricole de l'eau, dans les zones centre et nord du Sénégal. Doc. mult. ISRA CNRA Bambey, 23 p.
- DANCETTE C., 1979 - Principales contraintes hydriques et pédoclimatiques concernant L'adaptation des cultures pluviales dans la moitié sud du Sénégal, in "Soils and climatic ressources and constraints in relation to food crop production in West Africa", proc. Symp. Ibadan 1979, IITA Ibadan édit.
- DANCETTE C. et NICOU R., 1975 - Economie de l'eau dans les sols sableux du Sénégal. Doc. mult. IRAT Sénégal (doc. provisoire), 20 p.

- DANCET' TE C. et HALL T., 1979 - Agroclimatology applied to water management in the Sudanian and Sahelian zones of Africa. Ecol. stud., 34.
- DAS D.K. et JAT R.L., 1977 - Influence of three soil water regimes on root porosity and growth of four rice varieties. Agron. J., 692, 197-200.
- DAUDET F.A. et VACHAUD G., 1977 - La mesure neutronique du stock d'eau et de ses variations. Application à La détermination du bilan hydrique. Ann. agron., 28, 503-519.
- DREW M.C., 1979 - Properties of roots which influence rate of absorption in "The soil-root interface". Halley et Russel edit. New York, 21-38.
- DUCERF P., 1978 - Synthèse des travaux effectués sur La modélisation de La fixation d'azote d'une culture d'arachide au Sénégal. Doc. mult. ISRA CNRA Bambey, Sénégal, 28 p.
- EPSTEIN E., 1953 - Mechanisms of ion absorption by roots. Nature, 171, 83-87.
- EPSTEIN E. et HAGEN E., 1952 - A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. Plant physiol., 27, 457-474.
- FEDDES R.A., KOWALIK P., KOLINSKAMALINKA K. et ZARADNY H., 1976 - Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependant root extraction function. J. hydrol., 31, 13-26.
- FEHRENBACHER J.B. et RUST R.H., 1956 - Corn root penetration in soil derived from various textures of Wisconsin age glacial till. Soil Sci., 82, 369-378.
- FEHRENBACHER J.B., JOHNSON R., ODELL R.T. et JOHNSON P.E., 1960 - Root penetration and development of some farm crops as related to soil physical and chemical properties, proc. 7th int. cong. SoilSci. Madison USA, 243-252.
- FLAIG W., OTTO H., KUSTER E. et REINEMUND K., 1954 - Veer die Einwirkung von chemischen verwandten von huminsainevorstufen suf das längen wachstur von wurseIn. Land bouwkunding Tidjiachr, 66, 365-374.
- FORESTIER J., 1979 - Observations pour La connaissance du riz pluvial. Doc. mult. centre ORSTOM Adiopodoumé Côte d'Ivoire, 36 p.
- FOY C.D., 1974 - Effect of aluminium on plant growth, in : "the plant root and its environment" CARSON ed. University press Virginia Charlottesvi Ile USA, 601-642.
- FRIED M. et BROESHART H., 1967 - The soil plant system in relation to inorganic nutrition, academic press ed. New York, 358 p.
- 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.
- GANRY F. et SIBAND P., 1974 - Fertilisation, production et gestion du milieu en zone tropicale sèche. Doc. mult. IRAT Sénégal, 16 p.

- GANRY F., 1975 - Action de la dose et de la date d'application de l'azote sur la fixation symbiotique et le rendement de l'arachide. Doc. mult. ISRA CNRA Bambey, 30 p.
- GIL W.R. et MUCLER D., 1956 - A method for study the influence of mechanical impedance and aeration on the growth of seeding roots. Soil sci. Am. proc., 20, 154-159.
- GARDNER W.R., 1964 - Relation of root distribution of water uptake and availability. Agron. J., 56, 41-45.
- GAUTREAU J., 1977 - Niveaux de potentiels foliaires intervariétaux et adaptation de l'arachide à la sécheresse au Sénégal. Oléagineux, 32, 323-332.
- GAUTHERET R., 1968 - Température et rhizogénèse des tissus de topinambour cultivés in vitro. C.R. Acad. Sci. Sér. A : Sci. Nat., 266, 770-775.
- GUERRIER C. et MORARD P., 1978 - Influence de l'aluminium sur la nutrition minérale de la fève (calcicole) et du lupin (calcifuge). Soil sci. plant. Nutr 24, 441-448.
- HALL A.E. et DANCETTE C., 1971 - Analysis of a fallow farming system in semi-arid Africa using a model to simulate the hydrologic budget. Agron. J., 70, 816-823.
- HAMILTON D.G., 1951 - Culm, crown and root development in oats as related to lodging. Sci. Agric., 30, 51-110.
- HAMON G., 1978 - Caractérisation hydro-dynamique in situ de deux sols de la région centre nord du Sénégal. Doc. mult. ISRA CNRA Bambey Sénégal, 27 p.
- HARRIS H.C., 1968 - Evaluation of root yields. Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc., 28, 204-209.
- HELLER R., 1969 - Biologie végétale tome III nutrition et métabolisme. Masson ed. Paris, 578 p.
- HELLER R., 1974 - L'absorption minérale chez les végétaux. Monographie de physiologie végétale. Masson ed., Paris, 160 p.
- HENIM S., FEODOROFF A., GRAS R. et MONNIER G., 1960 - Le profil cultural. Soc. éd. ing. agric. ed., Paris, 320 p.
- HIDDING A.D. et VANDENBERG C., 1960 - The relation between pore volume and the formation of root systems in soil with sandy layers. Proc. 7 th. int. cong. soil sci., 1, 366-373.
- HILLEL D. et TALPAZ H., 1976 - Simulation of root growth and its effect on the pattern of soil uptake by a non uniform root system. Soil sci., 121, 307-311.
- HILLEL D., TALPAZ H. et VAN KEULEN H., 1976 - A macroscopic scale model of water uptake by a non uniform root system and water and salt movement in the soil profile. Soil sci., 121, 242-245.

- HOPKINS R.D. et PATRICK J.H., 1969 - Combined **effect** of oxygen content and soil compaction on root penetration. Soil sci., 108, 408-413.
- JENNY H., 1953 - Contact phenomena between absorbants and their **signifiacnce** in plant nutrition, in : "Mineral nutrition of plants". Truog **univ.** Wisconsin press ed., 107-132.
- JONES C.A., TAN N.V. et ZIMMERMAN F.J.P., 1978 - Root system development in upland rice on three **Brazilian latosols**, in **proc. 11 th. cong. int. soc. soil sci.** Edmonton Canada.
- JORDAN W.R., MILLER F.R. et MORRIS D.E., 1979 - Genetic variation in root and shoot growth of sorghum in hydroponics. Crop sci., 19, 468-472.
- KAFKAFI V., KARHIZ Z., ALBASAL N. et ROODICK J., 1965 - Root **activity** of dryland sorghum as mesured by radio phosphorus uptake and water **consumption**. **Isotop rad. in soil plant nut. stud.** IAEA FAO Ankara, 481-488.
- KAMACHARYA B.C., 1973 - Root development of four spring wheat **cultivars** in green house experiments. 528 Norges **landbruks hogaskole inst. of plant kultur.**
- KANITKAR N.V., 1944 - Dry farming in India. **Sci. mon. imp. council agric. res.**, 15, 352 p.
- LEA J.D., 1961 - Studies on depth and rate of root penetration of some **annual tropical crops**. Trop. agric. trin., 38, 93-105.
- CEE H.A., 1927 - The method of mesuring extent of roots in the **soil**. Rep. Hawaii sug. Tech., 6, 56-59.
- LEMAIRE F., 1974 - Actions comparées de L'azote et du phosphore sur La croissance des racines et des parties aériennes des plantes. C.R. acad. Agric. Fr., 3, 226-233.
- LIEBHART W.C. et MURIFOCK J.T., 1965 - **Effect** of potassium on morphology and lodging of corn. Agron. J., 57, 325-328.
- MAERTENS C., 1964 - La résistance mécanique à la pénétration - ses facteurs et son influence sur l'enracinement. Ann. agron., 15, 539-554.
- MAERTENS C., 1964 - Influence des propriétés physiques des sols sur le développement **radiculaire** et conséquences sur L'alimentation hydrique et azotée des cultures. Sci. Sol, 2, 31-41.
- MAERTENS C., 1970 - Influence des conditions de milieu sur l'absorption de L'eau et **des** éléments minéraux par Les systèmes radiculaires de quelques graminées cultivées. Thèse Ing. **Doct.**, Université de Toulouse, 162 p.
- PIAERTENS C., 1971 - Etude expérimentale de L'alimentation hydrique du maïs. Capacité d'absorption des parties **basales** et **apicales** du **zea maïs**. C.R. Acad. Sci. Sér. D : Sci. nat., 273, 730-732.
- FIAERTENS C., 1971 - Etude expérimentale de L'alimentation hydrique et minérale du maïs - détermination des besoins de La plante et des possibilités d'absorption de L'azote du phosphore et du potassium par les racines de zea maïs. C.R. Acad. Sci. Sér. D : Sci. nat., 273, 682-684.

- MAERTENS C., 1971 - Etude expérimentale de l'alimentation minérale et hydrique du maïs - détermination des possibilités maximales d'absorption pour le phosphore et le potassium des racines de zea maïs au contact de deux sols différents. C.R. Acad. Sci. Sér. D : Sci. nat., 273, 809-811.
- MAERTENS C., 1979 - The importance of rooting in the nutrition of crops, in "the soil root interface" Academic press ed. New York, 428 p.
- MAERTENS C., MORIZET J. et STUDER R., 1965 - Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons. Ann. agron., 16, 15-23.
- 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. I) régimes hydriques, systèmes racinaires et modalités d'alimentation en eau. Ann. agron., 25, 575-586.
- MAERTENS C. et BOSCH M., 1976 - Quelques aspects du rôle des racines dans la nutrition des plantes de grande culture. C.R. 4ème coll. "le contrôle de l'alimentation des plantes cultivées", Gent, 489-498.
- 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.
- MASCHHAUPT J.C., 1915 - De Bewortelling onze culturgewassen. Versl Landbouwk onderz., 16, 78-89.
- MASSAD CHOUAKI, 1979 - Rôle de l'extraction racinaire dans les modalités d'utilisation de l'eau du sol par les cultures - Application à l'irrigation. Thèse Ing. Doct. Université de Toulouse., 159 p.
- MAURY P. et RIVOIRE R., 1963 - Enracinement du pêcher et fertilisation. Rapp. cong. de pomologie de Sion, 210-222.
- MENGEL K., 1974 - Ion uptake and translocation. In "the plant root and its environment", CARSON ed. University press of Virginia USA, 83-100.
- MEREDITH H.L. et PATRICKS W.H., 1961 - Effect of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. Agron. J., 52, 163-167.
- MILLER E.C., 1916 - Comparative study of the root system and leaf of corn and sorghum. Agric. Res., 6, 311-347.
- MIRREH M.E. et KETCHESON J.W., 1973 - Influence of soil water matric potential and resistance to penetration for corn root elongation. Can. J. Soil sci., 53, 383-388.
- MIYASAKA A., 1969 - Studies on the strength of rice root II on the relationship between root strength and lodging. Proc. crop Sci. Soc. Jpn., 39, 7-14.
- MOLZ F.J. et REMSON I., 1970 - Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. Water Resour. Res., 6, 1346-1356.
- MORIZET J. et ROBÉLIN M., 1975 - Evaluation de la poussée racinaire - confrontation des résultats avec les données de la théorie osmotique - calcul de la conductivité de la racine pour l'eau. Ann. agron., 26, 127-137.

- NAKAYAMA F.S. et VAN BAVEL C. H. M., 1963 - Root activity distribution of sorghum and soil moisture conditions. Agron. J., 55, 271-274.
- NEMETH K., MENGEL K. et GRIME M., 1969 - Concentration of K, Ca, Mg in the saturation extract in relation to exchangeable K, Ca, Mg. Soil sci., 109, 349-354.
- NEWMAN E.I., 1965 - A method of estimating the total length of root in a sample. J. appl. ecol., 3, 139-145.
- NICOU R., 1974 - Contribution à L'étude et à l'amélioration de la porosité des sols sableux et sablo-argileux dans la zone tropicale sèche. Conséquences agronomiques. Agron. trop., 29, 1100-1127.
- NICOU R., 1975 - Le problème de la prise en masse à la dessiccation des sols sableux et sablo-argileux de La zone tropicale sèche. Agron. trop., 30, 325-343.
- NICOU R., 1977 - Le travail du sol dans Les terres exondées du Sénégal. Motivations contraintes. Doc. mult. ISRA CNRA Bambey, Sénégal, 51 p.
- NICOU R. et THIROUIN H., 1968 - Mesures sur la porosité et l'enracinement. Premiers résultats. Doc. mult. IRAT Sénégal, 52 p.
- NICOU R., SEGUY L. et HADDAD G., 1970 - Comparaison de L'enracinement de quatre variétés de riz pluvial en présence ou absence de travail du sol. Agron. trop., 25, 639-659.
- NICOU R. et CHOPART J.L., 1979 - Les techniques d'économie de l'eau dans les sols sableux du Sénégal, in "soil physical properties and crop production in the tropics", J. Wiley & Sons edit., 375-384.
- NIELSEN K.F., 1974 - Roots and root temperatures, in "the plant root and its environment". University press of Virginia. CARSON ed., 293-333.
- NYE P.H., 1972 - Localised movement of potassium ions in soil. Int. potash inst. coll. Berne, 147-156.
- NYE P.H. et MARIOTT H., 1969 - A theoretical study of the distribution of substances around root s, resulting of simultaneous diffusion and mass flow, Plant soil, 30, 459-479.
- ONDERDONK J.J. et KETCHESON J.W., 1973 - Effect of soil temperature on direction of corn root growth. Plant soil, 39, 177-186.
- ORGLAS A., 1951 - Recherches préliminaires sur le système racinaire de l'arachide. Oléagineux, 10, 571-575.
- PAVLYCHENKO T.K., 1937 - The soil block washing method in quantitative root study. Can. J. res., 152, 33-57.
- PAVLYCHENKO T.K., 1937 - Quantitative study of the entire root systems of weed and crop plants under field conditions. Ecology, 18, 62-69.

- PELERENTS C., 1958 - Etude du système racinaire du riz de terre ferme en conditions naturelles. Bull. agric. Congo belg., X LIX, 1269-1289.
- PERIGAUD Suzanne, 1966 - Effet de la résistance mécanique et du déficit en oxygène sur la croissance du maïs. C.R. Acad. sci., Sér. D : Sci. nat., 695-707.
- IPERIGAUD Suzanne, 1967 - Effet du manque d'oxygène et de l'excès d'eau au niveau des racines sur la croissance et la nutrition globale de la plante. Ann. agron., 18, 485-506.
- PICARD D., 1973 - Incidence d'une période sèche de courte durée sur l'émission des racines primaires de Panicum maximum. C.R. Acad. agric. Fr., 59, 1975-1985.
- IPICARD D. et JACQUOT M., 1976 - Rythmes d'émission comparés des racines nodales de trois variétés de riz. Agron. trop., 31, 159-169.
- IPIERI C., 1976 - L'acidification des terres de cultures exondées au Sénégal. Agron. trop., 31, 339-368.
- PIERI C., 1977 - Minéralogie et propriétés de surface de deux sols sableux du Sénégal. Agron. trop., 32, 339-352.
- PINTHUS M.J., 1967 - Shread on the root system as an indicator of evaluating lodging resistance of wheat. Crop. sci, 7, 107-110.
- PUECH J., 1969 - Etude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols vers une zone d'absorption. Ann. agron., 20, 245-261.
- RACZ C.L., RENNIE D.A. et HUTCHEON W.C., 1964 - The ³²P injection method for studying the root system of wheat. Can. J. soil, 44, 245-261.
- IRATNASWAMI M.L., 1960 - Studies in cereals. Structure in relation to drought resistance. Madras agric. J., 181-196.
- REYNIERS F. N., KALMS J.M. et RIDDERS J., 1976 - Différences de comportement d'un riz pluvial et d'un riz irrigué en conditions d'alimentation hydrique déficitaire. Etude des facteurs permettant d'esquiver la sécheresse. Agron. trop., 30, 179-187.
- IREYNIERS F.N., TRUONG B. BOIS J.F., BONNIN E. et THOMIN G., 1979 - Caractérisation de l'enracinement du riz pluvial in situ avec Le phosphore 32. In "Isotopes and radiation in research on soil-plant relationships" AIEA ed. Vienne, 635-647.
- RIOS M.A. et PEARSON R.W., 1964 - Some chemical factors in cotton development. Soil sci. Soc. Am. Proc., 28, 232-235.
- ROY J.K., 1967 - Anatomical studies in the genus oryza VI root anatomy and the mode of adventitious root development in rice. Oryza j. assoc. res., 41, 67-73.
- RUSSEL R.S. et CROSS M.J., 1974 - Physical aspects of soil fertility. The response of roots to mechanical impedance. Neth. j. agric. Sci., 2, 305-312.

- SCHUURMAN J.J. et GOEDEWAGEN M.A.J., 1956 - Growth and root penetration of spring wheat on various loam profiles, underloam by sand in relation to the fertilization of subsoil. IV^{ème} cong. int. sci. soil rapp., D, 325-334.
- SCHUURMAN D.T. et GOEDEWAGEN M.A.J., 1965 - Methods for examination of roots systems and roots. Center for agric. publ. and doc. ed. Wageningen, 85 p.
- SECHLER D.T., 1961 - Root development and Lodging resistance in oats. Mo. agric. exp. Stn. Bull., 769-780.
- SEGUY L., 1970 - Influence des facteurs pédologiques et des techniques culturales sur la croissance et la production du riz pluvial en Casamance (Sénégal méridional). Doc. mult. IRAT Paris, 97 p.
- SIBAND P., 1979 - Evolution pondérale du système grain-plante chez le mil (pennisetum typhoides) au cours de L'épuisement du grain. Agron. trop., 34, 250-253.
- TAYLOR H.M., 1979 - Mechanical independence to root growth. Proc. conf. "Priorities for elevating soil related constraints for food production in the tropics" IRRI Los Banos Laguna (Philippines).
- TAYLOR H.M. et GARDNER M.R., 1963 - Penetration of cotton Seedling top roots as influenced by density, moisture content and strength of soil. Soil sci., 96, 153-156.
- TAYLOR H.M. et KLEPPER B., 1975 - Water uptake by cotton root systems : an examination of assumptions in the single root model. Soil sci., 120, 57.
- TAYLOR H.M. et KLEPPER B., 1978 - The role of rooting characteristics in the supply of water to plant. Adv. agron., 30, 99-128.
- TOURTE R., 1951 - Préparation du sol et enfouissement de La végétation naturelle comme engrais vert - leur influence sur les rendements du mil au Sénégal. Ann. cent. natl. rech. agron. Bambey, Sénégal, 120-125.
- TOURTE R., CHARREAU C., NICOU R., POULAIN J.F., 1967 - Le rôle des facteurs mécaniques (travail du sol) dans la création et L'amélioration du profil cultural en zone tropicale sèche - incidence sur la production agricole. Actes du colloque sur La fertilité des sols tropicaux, Tananarive, 2, 1547-1569.
- VAN BAVEL C.H.M., STIRK 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.
- VAUCLIN H., HAVERKAMP R. et VACHAUD G., 1975 - Transferts hydriques dans le système sol-plante-atmosphère. Simulation et prévision. Proceedings of a meeting on efficiency of water and fertilizers use in semi-arid regions Bambey, Sénégal. AIEA. Vienne, 195-213.
- VIDAL P., 1963 - Croissance et nutrition minérale des mils (Pennisetum) cultivés au Sénégal. Thèse ing. doct. Université de Dakar, 88 p.

WETSELAAR R. et NORMAN M. J. T., 1960 - Recovery of available soil nitrogen by annual fodder at Katherine Northern Territory. Aust. j. agric. res.

WEY J., OBATON M., 1978 - Incidence de quelques techniques culturales sur l'activité fixatrice d'azote et Le rendement de L'arachide. Agron. trop., 33, 129-135.

WILLIAMSON R. E., WILLEY C. R. et GRAY T. N., 1969 - Effect of water table depth and flooding on yield of millet. Agron. J., 61, 310-313.